



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Departamento Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos  
Escuela de Ingenierías Industriales

## **TESIS DOCTORAL**

**BIODOMÓTICA: OPTIMIZACIÓN DE LA ARQUITECTURA PASIVA  
MEDIANTE EL USO DE LAS TECNOLOGÍAS DE CONTROL INTELIGENTE  
Y AUTOMATIZACIÓN**

**Kusha Ghoreishi Karimi**

**Programa de Doctorado en Ingeniería Mecatrónica**

**Directores:**

**Dr. Luis Parras Anguita**

**Dr. Alberto Fernández Gutiérrez**

**Universidad de Málaga**


**Febrero de 2022**





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

AUTOR: Kusha Ghoreishi Karimi

 <https://orcid.org/0000-0002-1988-5262>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)





## **Autorización para la lectura de la tesis e Informe de la utilización de las publicaciones que la avalan**

Los abajo firmantes declaran, bajo su responsabilidad, que autorizan la lectura de la tesis del doctorando D. Sayed Kusha Ghoreishi Karimi, titulada “Biodomótica: Optimización de la arquitectura pasiva mediante el uso de las tecnologías de control inteligente y automatización” y que ninguna de las publicaciones que avalan dicha tesis han sido utilizadas en tesis anteriores.

Dr. Luis Parras Anguita

Profesor Titular de Universidad

Dpto. Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos.

Área de Mecánica de Fluidos.

Dr. Alberto Fernández Gutiérrez

Profesor Titular de Universidad

Dpto. Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos.

Área de Máquinas y Motores Térmicos.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



# DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

**D. SAYED KUSHA GHOREISHI KARIMI**

Estudiante del programa de doctorado de INGENIERÍA MECATRÓNICA de la Universidad de Málaga, autor/a de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: **BIODOMÓTICA: OPTIMIZACIÓN DE LA ARQUITECTURA PASIVA MEDIANTE EL USO DE LAS TECNOLOGÍAS DE CONTROL INTELIGENTE Y AUTOMATIZACIÓN**

Realizada bajo la tutorización de ALFONSO GARCÍA CERESO y dirección de LUIS PARRAS ANGUITA Y ALBERTO FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 2 de FEBRERO de 2022

FDO. SAYED KUSHA GHOREISHI KARIMI  
DOCTORANDO

FDO.: ALFONSO GARCÍA CERESO  
TUTOR/A

FDO.: LUIS PARRAS ANGUITA Y ALBERTO FERNÁNDEZ GUTIÉRREZ  
DIRECTOR/ES





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Departamento Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

Escuela de Ingenierías Industriales

# TESIS DOCTORAL

BIODOMÓTICA: OPTIMIZACIÓN DE LA  
ARQUITECTURA PASIVA MEDIANTE EL USO DE  
LAS TECNOLOGÍAS DE CONTROL INTELIGENTE Y  
AUTOMATIZACIÓN

**Kusha Ghoreishi Karimi**

Programa de Doctorado en Ingeniería Mecatrónica

Directores:

Dr. Luis Parras Anguita

Dr. Alberto Fernández Gutiérrez

Universidad de Málaga

Febrero de 2022





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



©2021 - Kusha Ghoreishi Karimi

Todos los derechos reservados



A mis padres, esposa e hijos, por estar siempre ahí apoyándome y ser mi principal fuente de inspiración para seguir creciendo cada día.

A mis directores de tesis Luis y Alberto, por su dedicación y paciencia; por su calidad humana e imprescindible acompañamiento en este maravilloso proceso de investigación.

A mis compañeros de trabajo, colaboradores y amigos, por contribuir constantemente en mi desarrollo personal y profesional.

Sin todos ellos, no hubiera sido posible llevar a cabo este trabajo.



# BIODOMÓTICA: OPTIMIZACIÓN DE LA ARQUITECTURA PASIVA MEDIANTE EL USO DE LAS TECNOLOGÍAS DE CONTROL INTELIGENTE Y AUTOMATIZACIÓN.

<b>1. Introducción.</b>	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Evolución histórica de la arquitectura	1
1.3 Biodomótica	7
1.4 Confort térmico y bienestar en edificios. Contaminantes físicos y químicos	14
1.5 Medición de variables climáticas	23
1.6 Objetivos	26
1.7 Estructura de la tesis	28
<b>2. Estimación eficiente del confort térmico empleando un modelo de red neuronal.</b>	31
2.1 Modelos teóricos del confort térmico	31
2.1.1 Modelo Fanger	31
2.1.2 Modelo COMFA	32
2.2 Modelo de redes neuronales artificiales y algoritmo C-Mantec	33
2.3 Estudio experimental con voluntarios	36
2.3.1 Elementos de control de variables ambientales	36
2.3.2 Medición de elementos de variables ambientales	37
2.3.3 Grupo de estudio	38
2.4 Resultados	40
2.5 Conclusiones	43
<b>3. Sensor remoto de bajo coste para aplicaciones de medida de temperatura operativa, humedad relativa, CO<sub>2</sub>, radón y luminosidad.</b>	47
3.1 Estado de la cuestión	47
3.2 Diseño de nodos de sensores	49
3.3 Ensayos y ajustes de medida	54
3.4 Conclusiones	56
<b>4. Rehabilitación y monitorización de una villa mediterránea mediante mediciones in situ y simulación informática</b>	59
4.1 Descripción del caso de estudio	60
4.2 Metodología	61
4.3 Modelo de simulación	64
4.3.1 Modelo SolarVenti	64
4.4 Medidas ambientales in situ	66
4.5 Resultados	68
4.5.1 Validación de los resultados	69
4.5.2 Efecto global de la renovación	70
4.6 Conclusiones	75
<b>5. Conclusiones y trabajos futuros</b>	77
5.1 Conclusiones	77
5.2 Trabajos futuros	78



## Índice de abreviaturas

**ACS:** Agua Caliente Sanitaria  
**AI:** Artificial Intelligence  
**ANN:** Artificial Neural Network  
**BREEAM:** Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology  
**CFD:** Computational Fluid Dynamics  
**CSN:** Consejo Nacional de Seguridad  
**COMFA:** COMFort formula  
**COV:** Compuestos Orgánicos Volátiles  
**EECN:** Edificios de consumo de Energía Casi Nulo  
**EHS:** Electromagnetic hypersensitivity  
**EPA:** Environmental Protection Agency  
**HVAC:** Heating, Ventilating, Air Conditioned  
**IAQ:** Indoor Air Quality  
**IBN:** Institut für Baubiologie+Oekologie Neubeuern  
**IEQ:** Environment Quality  
**IMC:** Índice de Masa Corporal  
**IoT:** internet of Things  
**IT:** Information Technologies  
**LEED:** Leadership in Energy and Environmental Design  
**MCS:** Multiple Chemical Sensitivity  
**MFRRn:** Modular Facade Retrofit with Renewable energy technologies  
**MSE:** Mean Squared Error  
**nZBE:** nearly Zero-Energy Building  
**OMS:** Organización Mundial de la Salud  
**PA:** Presión Arterial  
**PCA:** Principal component Analysis  
**PCM:** Phase Change Materials  
**PHI:** Passive House Institute  
**PMV:** Predicted Mean Vote  
**PPD:** Predicted Percentage of Dissatisfied  
**RNA:** Redes Neuronales Artificiales  
**SATE:** Sistema de Aislamiento térmico exterior  
**SQM:** Síndrome Químico Múltiple  
**VIP:** Vacuum Insulated Panel





## Índice de Figuras

<b>Fig. 1.1</b>	Santuario Göbekli Tepe. Turquía. Complejo Magalítico, periodo Neolítico (X milenio a.C). Beytullah Eles 2019.	3
<b>Fig. 1.2</b>	a) Alhambra, refrescamiento mediante láminas de agua. Granada, b) Esquema de funcionamiento de refrescamiento mediante lámina de agua.	3
<b>Fig. 1.3</b>	a) Shish Badgiri, Yazd, Irán. Torres de viento para ventilación y refrigeración natural de los edificios y evacuación de aire caliente en verano. Diego Delso (2016), b) Esquema de funcionamiento de torre de viento.	4
<b>Fig. 1.4</b>	a) Villa romana de la Olmeda, Pedrosa de la Vega (Palencia) sistema de calefacción del suelo mediante el hipocausto, b) Esquema de salida de humos de combustión.	4
<b>Fig. 1.5</b>	Escuela Bauhaus en Dessau, Walter Gropius. El uso del acero, vidrio y el cemento en la arquitectura de inicios del s.XX.	5
<b>Fig. 1.6</b>	Centro Pompidou, Richards Rogers y Renzo Piano. Emblema del movimiento High-Tech donde se realiza la tecnología detrás de la arquitectura.	6
<b>Fig. 1.7</b>	(a) Consumo final de electricidad y (b) emisiones de CO <sub>2</sub> por sectores en 2018.	8
<b>Fig. 1.8</b>	Proyecto de vivienda Biodomótica en Vicar. Ghoreishi-Casado (2006). Esquemas de funcionamiento de la vivienda.	13
<b>Fig. 1.9</b>	Casa Biodomótica en Alhaurín. Esquema de funcionamiento en verano e invierno.	14
<b>Fig. 1.10</b>	Casa Biodomótica en Alhaurín. Comportamiento térmico de la vivienda obtenido mediante software de simulación energética <i>EnergyPlus</i> .	14
<b>Fig. 1.11</b>	Diagrama Psicrométrico estándar ASHRAE 55-2004. Estudio para una vivienda (Málaga).	18
<b>Fig. 1.12</b>	Aparatos de medición utilizados a) Medidor de ambiente para medición de temperatura y humedad (Modelo PCE-EM882); b) Solarímetro para medición de niveles de irradiancia (Modelo Kimo SL 100); c) Anemómetro portátil para la obtención de la velocidad del viento (Modelo PCE-AM81); d) Cámara termográfica para detección de fallas en aislamiento y puentes térmicos (Modelo FLIR E50); e) Ventilador de puerta con manómetro digital de precisión para test de estanqueidad de edificios (modelo DG-700); f) Instrumento de medición multifunción para la calibración de los datos de T, HR y CO <sub>2</sub> de sensores de baja sensibilidad (Testo 480).	25

<b>Fig. 1.13</b>	Otros aparatos de medición de contaminantes físicos y químicos: a) Medidores de campos eléctricos y magnéticos alternos de baja frecuencia (Modelo ME 3830B de GIGAHERTZ); b) Medidores de alta frecuencia para medición de campos electromagnéticos (modelo HF32D de GIGAHERTZ); c) Magnetómetros digitales para medir campos magnéticos continuos (Modelo MFM-2 de ROM); d) Medidor de gas radón (Modelo Canary de Corentum).	25
<b>Fig. 2.1</b>	Porcentaje estimado de insatisfechos <i>PPD</i> de un grupo en relación con el valor <i>PMV</i> en el rango [-3,3].	32
<b>Fig. 2.2</b>	Dispositivos utilizados para controlar las variables ambientales, (a) CSI-OQ-1000 Thorn lamp (radiación), (b) Ventilador industrial mf-30p (viento), (c) Haier Brezza-12K Sistema aire acondicionado (temperatura y humedad), y (d) humidificador Beurer LB-88 (humedad).	36
<b>Fig. 2.3</b>	Dispositivos utilizados para medir las variables involucradas en el estudio: (a) medidor de ambiente PCE-EM882 (temperatura), (b) Solarímetro Kimo SL 100 (nivel de irradiancia), (c) PCE-AM81 anemómetro portátil (velocidad del viento).	37
<b>Fig. 2.4</b>	Porcentaje de varianza explicado por cada uno de los componentes principales (barras verticales) y el valor acumulado (línea continua).	40
<b>Fig. 2.5</b>	Representación <i>PCA</i> de los datos. Las ocho variables (líneas continuas) y los datos grabados del sujeto (puntos rojos) se representan en el espacio bidimensional del primer y segundo componente principal.	40
<b>Fig. 2.6</b>	Arquitectura de red neuronal generada por el algoritmo <i>C-Mantec</i> para estimar en función de las 9 variables de entrada si un sujeto humano se encuentra en una situación de confort o no.	43
<b>Fig. 2.7</b>	Probabilidad de decisión correcta del sistema de red neuronal diseñado de acuerdo con los dos primeros componentes principales de los patrones de entrada.	44
<b>Fig. 2.8</b>	Distribución de <i>MSE</i> para los cuatro modelos utilizados para el caso de predicción del confort térmico en 5 categorías (frío, fresco, neutro, cálido y calor). Nota: la escala del eje Y es diferente en cada caso (consultar texto para obtener más detalles).	45

<b>Fig. 3.1</b>	Prototipos desarrollados a) Temperatura seca y humedad relativa. Pilas, reloj y micro SD. Arduino Pro Mini. b) T <sup>a</sup> seca, HR y sensor de CO <sub>2</sub> con batería recargable. Arduino Nano c) Sensores conectados a Wifi. Nuevo sensor de radón y NodeMCU V1 d) Sensores de T <sup>a</sup> globo, luminosidad. Reloj y micro. SD. NodeMCU V3.	51
<b>Fig. 3.2</b>	Fabricación del termómetro de globo. Semiesfera negra y sensor DHT22. (a) dispositivo empleado para ubicar la construcción del sensor de globo, (b) introducción del sensor de temperatura seca y humedad relativa, c) sensor terminado.	53
<b>Fig. 3.3</b>	Ensayos para medir la temperatura de globo y ajuste de la medida con el equipo de referencia Testo 480.	54
<b>Fig. 3.4</b>	Medidas obtenidas con el nodo sensor: T <sub>s</sub> (°C).	54
<b>Fig. 3.5</b>	Medidas obtenidas con el nodo sensor: HR(%).	55
<b>Fig. 3.6</b>	Ensayos para medir la luz ambiente y ajuste de la medida con el equipo de referencia Testo 480. Sensor de luz: TSL2591.	55
<b>Fig. 3.7</b>	Medidas obtenidas con el nodo sensor: CO <sub>2</sub> (ppm).	56
<b>Fig. 3.8</b>	Medidas obtenidas con el nodo sensor: Radón(Bq/m <sup>3</sup> ).	56
<b>Fig. 4.1</b>	Fotografía de la villa aislada mediterránea.	60
<b>Fig. 4.2</b>	(a) Ejemplo de fotografía termográfica de la villa. (b) Misma fotografía en luz visible.	61
<b>Fig. 4.3</b>	Detalles de la reforma implementada en la villa. (a) vista frontal de la villa, (b) sección de la vista frontal y (c) vista frontal del edificio de dos plantas. La posición de los diferentes dispositivos de monitorización se muestra en círculos azules.	63
<b>Fig. 4.4</b>	Ejemplos de algunas de las técnicas de aislamiento empleadas (a) techo del dormitorio principal, (b) techo del salón y (c) muro exterior.	64
<b>Fig. 4.5</b>	Esquema 3D de la villa desarrollada en Openstudio.	65
<b>Fig. 4.6</b>	(a) Boceto del Solarventi SV30AX para modelado en EnergyPlus. (b) Fotografía del dispositivo instalado en tejado	66
<b>Fig. 4.7</b>	(a) Dispositivo de medición que incluye Arduino Pro Mini, sensor de temperatura y humedad relativa con baterías y micro SD. (b) Protoboard para el desarrollo del dispositivo basado en Arduino Nano con sensor de CO <sub>2</sub> integrado.	68

<b>Fig. 4.8</b>	Ejemplo de calibración del dispositivo de medición de código abierto (OSMD). (a) Temperatura, (b) Humedad Relativa y (c) Concentración de CO <sub>2</sub> .	68
<b>Fig. 4.9</b>	Resultados de los experimentos y simulación para la temperatura y humedad relativa en (a) salón y (b) dormitorio principal.	70
<b>Fig. 4.10</b>	Demanda media de calefacción de la villa durante cinco años, para el caso de la vivienda inicial (cuadrados) y la villa con la renovación realizada (círculos). La barra de error muestra la desviación estándar de los cinco años.	71
<b>Fig. 4.11</b>	Media mensual durante cinco años de la energía consumida para calefacción en la vivienda y su comparación con la vivienda renovada, tanto para estufas de pellet como SolarVenti. Se incluye el consumo eléctrico estimado en iluminación y electrodomésticos. Las barras de error son la variación estándar de los cinco años considerados.	72
<b>Fig. 4.12</b>	Promedio mensual de cinco años de ahorro energético en la villa renovada respecto a la inicial, junto con el porcentaje de energía renovable en la energía total obtenida en la vivienda final.	72
<b>Fig. 4.13</b>	Porcentaje de horas en confort en el salón y dormitorio principal de la villa inicial y la villa renovada para la temporada de invierno y verano.	74
<b>Fig. 4.14</b>	(a) y (b): Condiciones de temperatura y humedad relativa del aire del salón y del dormitorio de la villa en su estado inicial y en su estado reformado. (c) y (d): Condiciones de temperatura y concentración de CO <sub>2</sub> del aire en el salón y en el dormitorio para la villa en su estado inicial y en su estado reformado.	75

## Índice Tablas

Tabla 1.1	Actividad metabólica según la actividad.	16
Tabla 1.2	Índice de arropamiento.	16
Tabla 1.3	Condiciones de diseño interiores. RITE.	17
Tabla 1.4	Valores de referencia para las zonas de alta permanencia. Norma SBM-2015.	22
Tabla 2.1	Confort térmico en relación con el balance energético obtenido de la escala COMFA.	33
Tabla 2.2	Características de los elementos utilizados para controlar las variables ambientales, (a) dispositivo de control de niveles de irradiancia, (b) dispositivo de control de la condición de viento, (c) dispositivo de control de sensación de temperatura y (d) dispositivo de control de la condición de humedad.	37
Tabla 2.3	Características de los dispositivos utilizados para medir la radiación solar (a), velocidad del viento (b) y temperatura y humedad (c).	38
Tabla 2.4	Conjunto de variables estándar y nuevas y su rango (o categoría) utilizado para la estimación de la sensación de confort térmico en los diferentes experimentos.	39
Tabla 2.5	Valores de precisión para la predicción de la sensación de <i>comfort – no comfort</i> según los métodos teóricos (Fanger y COMFA) y el método propuesto de neurocomputación <i>C-Mantec</i> . El rendimiento de <i>C-Mantec</i> se analizó utilizando como entradas las seis variables habituales (6 Var.) y un conjunto extendido de variables (9 Var.).	41
Tabla 2.6	Valores de precisión para la predicción de la sensación de confort percibida en 5 categorías según Fanger, modelos COMFA y <i>C-Mantec</i> . El rendimiento de <i>C-Mantec</i> se analizó utilizando como entradas las seis variables habituales (6 Var.) y un conjunto extendido de variables (9 var.).	44
Tabla 4.1	Rutina de ventilación para los diferentes meses del año.	65
Tabla 4.2	Horario de ocupación de la villa.	65
Tabla 4.3	Parámetros relativos al cálculo de los valores <i>PPD – PMV</i> .	73



## RESUMEN

Esta tesis doctoral versa sobre la Biodomótica, entendida como la interacción de dispositivos de la era tecnológica con la arquitectura para la mejora de la habitabilidad y la sostenibilidad ambiental. En la sociedad actual, las necesidades de protección medioambiental han fomentado el empleo de materiales naturales o reciclables y sistemas constructivos que mejoran el rendimiento energético de las construcciones. Estas soluciones están ampliamente extendidas en la concepción arquitectónica contemporánea. La implementación de dispositivos de control y automatización de los elementos que conforman estos nuevos edificios, las tecnologías para la predicción, medición de datos y simulación informática que permiten adoptar estrategias de diseño en la consecución de edificios más eficientes, así como la monitorización y optimización de los edificios existentes, son las herramientas que configuran la Biodomótica.

Este término de Biodomótica fue registrado por la empresa del autor en el Registro de Patentes y marcas en el 2008, y, desde entonces, su actividad profesional ha estado ligada a la implementación de este tipo de concepto arquitectónico en obra nueva y de rehabilitación. Es a través del presente trabajo de investigación donde se plantean las bases de la Biodomótica y se formaliza su implementación mediante aplicaciones reales en entornos exteriores e interiores.

En primer lugar, se repasa la evolución de la arquitectura hasta nuestros días donde la concepción de edificación pasiva adquiere especial importancia para contener el impacto medioambiental y el calentamiento global provocado por el uso de energías producidas mediante combustibles fósiles, principales causantes de las emisiones contaminantes a la atmósfera.

A continuación, se establecen las bases de la Biodomótica como solución para la consecución de edificios inteligentes y de consumo energético casi nulo (*nZEB*). Se parte de la arquitectura pasiva que contempla estrategias de diseño bioclimático y se analizan las tecnologías que disponemos en la actualidad para alcanzar los estándares de confort y consumos energéticos en consonancia con las necesidades globales y normativas internacionales. Para ello, se definen los parámetros físicos que establecen el confort de las personas, así como los modelos estándar de predicción de confort, y se propone en esta investigación un nuevo modelo de predicción basado en la inteligencia artificial mediante redes neuronales.

Asimismo, adquiere importancia en la investigación la obtención de datos climáticos y su procesamiento para definir las estrategias del diseño arquitectónico. Con este fin, se implementa una solución económica de toma de datos mediante sensores acoplados a plataformas de hardware libre de tipo Arduino que nos permiten disponer de los distintos datos climatológicos y de calidad de aire que posteriormente se introducirán en los programas de simulación en el desarrollo de los proyectos de arquitectura. Con esta solución,

se posibilita igualmente la monitorización de los espacios resultantes a efectos de reajustes en las estrategias adoptadas y el conocimiento de los hábitos de los usuarios para optimizar los consumos y el confort.

El principal objetivo de la tesis consiste en la implementación de un procedimiento de trabajo basado en la Biodomótica, en el cual, conociendo las necesidades de confort y demandas energéticas de los usuarios finales, la arquitectura se concibe y viene a ser complementada con estas tecnologías de automatización de procesos, toma de datos y control automático con el fin de mejorar su eficiencia energética y confortabilidad.

En el capítulo 2, se describe un experimento de un modelo de confort térmico neurocomputacional utilizando datos recopilados de 49 voluntarios expuestos a diferentes condiciones. Las redes neuronales artificiales implementadas a través del algoritmo constructivo C-Mantec se han utilizado para la estimación del confort térmico subjetivo, agregando también nuevas variables relacionadas con el sujeto al proceso de predicción para comparar los valores pronosticados con los percibidos por los sujetos. En el capítulo se describen los modelos Fanger y COMFA, seguidos de una descripción del algoritmo de red neuronal constructiva C-Mantec. Se desarrolla el proceso de recolección de datos y el equipo utilizado, junto con un análisis descriptivo de los datos obtenidos. Posteriormente, se analiza y discute la predicción obtenida por los tres modelos para concluir con las mejoras introducidas con el modelo neurocomputacional.

En el capítulo 3 se expone el diseño de un dispositivo que permite monitorizar espacios habitables y obtener parámetros de confort higrotérmico y eficiencia energética mediante sensores de bajo coste para la medición de parámetros de Temperatura seca, Temperatura operativa, Humedad relativa, CO<sub>2</sub>, Radón y Luminosidad. Se describe el diseño del sensor de bajo coste en distintas fases de desarrollo en función de los requerimientos de batería y capacidad de respuesta de las distintas plataformas de *hardware* ensayadas.

En un primer prototipo se incluyen solo los sensores de temperatura seca y humedad relativa con baterías de larga duración basado en la plataforma Arduino. Para la toma de datos de CO<sub>2</sub> se elabora un segundo prototipo donde se emplean baterías de mayor duración al requerir este nuevo sensor un mayor consumo de energía. Para incorporar los sensores de Temperatura de globo, Radón y luminosidad se fabrican los siguientes dos prototipos: el primero, con una batería en línea de mayor capacidad y el segundo, en el que, para la obtención de temperaturas operativas se incorpora un sensor de globo que requiere alimentación eléctrica. Los ensayos realizados y la toma de datos obtenidos se comparan con aparatos de medición comercial de alta precisión.

En el capítulo 4 se presenta el caso de estudio de una rehabilitación energética en una villa aislada ubicada en un clima mediterráneo. La metodología adoptada está alineada con los principios nZEB descritos anteriormente, pero las medidas de ahorro y soluciones energéticas están condicionadas por una premisa fundamental: que las personas que viven en la villa tienen el síndrome conocido como MCS (Sensibilidad Química Múltiple) y EHS



(Hipersensibilidad Electromagnética). Por tanto, los materiales utilizados en la construcción deben ser ecológicos, inocuos e inodoros, la ventilación del aire es fundamental con la transpirabilidad de las paredes, la oxigenación del ambiente y la renovación continua del aire, y la red de sensores/control debe ser adaptado a las especiales condiciones de salubridad y presencia de campos electromagnéticos. Por ello, dentro de la villa, las personas deben evitar los campos electromagnéticos y estar expuestos a bajos niveles de exposición química del medio ambiente.

En base a esto, las soluciones propuestas se adoptan para mejorar los requisitos de disminución de las demandas de calefacción y garantizar un alto nivel de ventilación. Con este objetivo, la solución pasiva llevada a cabo es una renovación de la envolvente aumentando el nivel de aislamiento y sustituyendo las carpinterías exteriores existentes por otras más eficientes.

Respecto a las soluciones activas, se han implementado dos medidas: la incorporación de tres colectores solares de aire, que introducen aire exterior controlado por termostato y la instalación de dos estufas de pellet que mantienen la temperatura de consigna en temporada de calefacción. Ambos sistemas activos son monitorizados y controlados por un sistema de control inteligente respaldado por una red de sensores de bajo costo.

En este capítulo, se explica la metodología seguida en la renovación, los detalles del modelo de simulación mediante el programa *EnergyPlus*, donde se incluyen los detalles del modelado de los colectores solares de aire. Para la toma de datos, entre otros aparatos, se emplea un dispositivo experimental basado en Arduino de bajo coste y desarrollado en el capítulo anterior. Los resultados obtenidos confirman la precisión de los métodos seguidos en la que también se comprueba que no se requiere procesos de calibración.

Las principales aportaciones de la tesis residen en el estudio y diseño de estrategias para la integración de las tecnologías desarrolladas de predicción, toma de datos y procesado de los mismos en la concepción arquitectónica, así como procedimientos sencillos de monitorización y control para los edificios.

Este trabajo abre un amplio campo de investigación para trabajos futuros en distintas disciplinas enfocadas a la obtención de edificios inteligentes, la prefabricación e industrialización en la arquitectura y el empleo de las tecnologías de la información como pueden ser el internet de las cosas (IoT), la obtención de datos automatizados y su procesado mediante simulación con software informático para conocer el comportamiento térmico de los edificios.



## ENGLISH ABSTRACT

This doctoral thesis deals with Biodomotics, understood as the interaction of devices of the technological era with architecture for the improvement of habitability and environmental sustainability. In today's society, the needs of environmental protection have encouraged the use of natural or recyclable materials and construction systems that improve the energy performance of buildings. These solutions are widespread in contemporary architectural design. The implementation of control and automation devices for the elements that make up these new buildings, technologies for prediction, data measurement and computer simulation that allow the adoption of design strategies in the achievement of more efficient buildings, as well as the monitoring and optimization of existing buildings, are the tools that make up Biodomotics.

This term, Biodomotics, was registered by the author's company in the Registry of Patents and Trademarks in 2008, and since then, his professional activity has been linked to the implementation of this type of architectural concept in new construction and rehabilitation. It is through this research work where the bases of Biodomotics are presented and its implementation is formalized through real applications in exterior and interior environments.

First of all, the evolution of architecture up to the present day is reviewed, where the conception of passive building acquires special importance to contain the environmental impact and global warming caused by the use of energy produced by fossil fuels, the main cause of polluting emissions into the atmosphere.

Next, the bases of Biodomotics are established as a solution for the achievement of intelligent buildings with almost zero energy consumption (*nZEB*). It is based on passive architecture that contemplates bioclimatic design strategies and analyzes the technologies currently available to achieve the standards of comfort and energy consumption in line with global needs and international regulations. For this purpose, the physical parameters that establish the comfort of people are defined, as well as the standard comfort prediction models, and a new prediction model based on artificial intelligence by means of neural networks is proposed in this research.

Also, it acquires importance in the research to obtain climatic data and its processing to define architectural design strategies. To this end, a cost-effective solution is implemented for data collection through sensors coupled to free hardware platforms of Arduino type that allow us to have the different climatological and air quality data that will later be introduced into the simulation programs in the development of architectural projects. With this solution, it is also possible to monitor the resulting spaces in order to readjust the adopted strategies and to know the habits of the users in order to optimize consumption and comfort.

The main objective of the thesis lies in the implementation of a working procedure based on Biodomotics, in which, knowing the comfort needs and energy demands of the final users,

the architecture is conceived and complemented with these technologies of process automation, data collection and automatic control in order to improve its energy efficiency and comfort.

In Chapter 2, an experiment of a neurocomputational thermal comfort model is described using data collected from 49 volunteers exposed to different conditions. Artificial neural networks implemented through the constructive neural network algorithm C-Mantec have been used for the estimation of subjective thermal comfort, adding also new subject-related variables to the prediction process to compare the predicted values with those perceived by the subjects. The chapter describes the Fanger and COMFA models, followed by a description of the C-Mantec constructive neural network algorithm. The data collection process and the equipment used are described, along with a descriptive analysis of the data obtained. Subsequently, the prediction provided by the three models is analyzed and discussed to conclude with the improvements introduced with the neurocomputational model.

Chapter 3 presents the design of a node that allows us to monitor living spaces and obtain hygrothermal comfort and energy efficiency parameters by means of low-cost sensors for the measurement of temperature, humidity, CO<sub>2</sub>, radon and luminosity parameters. The design of the low-cost sensor node is described in different manufacturing stages depending on the battery requirements and responsiveness of the different hardware platforms tested. A first node includes only temperature and relative humidity sensors with long-life batteries based on the Arduino platform. For CO<sub>2</sub> data collection, a second node model is elaborated where batteries of longer duration are used as this new sensor requires more energy capacity. To incorporate the Radon and luminosity sensors, the following two nodes are manufactured, the first one with a higher capacity in-line battery and the second one, in which a balloon sensor that requires electrical power is incorporated to obtain operative temperatures. The tests carried out and the data obtained are compared with high precision commercial measuring devices.

Chapter 4 presents the case study of an energy rehabilitation in an isolated villa located in a Mediterranean climate. The methodology adopted is aligned with the nZEB principles described above, but the energy saving measures and solutions are conditioned by a fundamental premise: that the people living in the villa have the syndrome known as MCS (Multiple Chemical Sensitivity) and EHS (Electromagnetic Hypersensitivity). Therefore, the materials used in the construction must be ecological, innocuous and odorless, the air ventilation is fundamental with the breathability of the walls, the oxygenation of the environment and the continuous renewal of the air, and the sensor/control network must be adapted to the special conditions of healthiness and presence of electromagnetic fields. Therefore, inside the villa, people must avoid electromagnetic fields and be exposed to low levels of chemical exposure from the environment.

Based on this, the proposed solutions are adopted to improve the requirements of decreasing heating demands and ensuring a high level of ventilation. With this objective, the passive solution carried out is a renovation of the envelope by increasing the level of insulation and replacing the existing exterior windows with more efficient ones.

With respect to active solutions, two measures have been implemented: the incorporation of three solar air collectors, which introduce thermostat-controlled outside air, and the installation of two pellet stoves that maintain the setpoint temperature during the heating season. Both active systems are monitored and controlled by an intelligent control system supported by a low-cost sensor network.

The chapter explains the methodology followed in the renovation, the details of the simulation model using *EnergyPlus* software, where the details of the modelling of the solar air collectors are included. For data acquisition, among other devices, a low-cost Arduino-based experimental device developed in the previous chapter is used. The results obtained confirm the accuracy of the methods followed in which it is also verified that no calibration processes are required.

The main contributions of the thesis lie in the study and design of strategies for the integration of the developed technologies of prediction, data acquisition and data processing in the architectural design, as well as simple monitoring and control procedures for buildings.

This work opens a wide field of research for future work in different disciplines focused on obtaining intelligent buildings, prefabrication and industrialization in architecture and the use of information technologies such as the internet of things (IoT), the collection of automated data and its processing by simulation with computer software to know the thermal behavior of buildings.



# CAPÍTULO 1

*“Sin duda había una forma de felicidad domótica, ligada al funcionamiento corriente, que ya no logramos entender; sin duda existía el placer de constituir un organismo funcional, adecuado, concebido para llevar a cabo una serie discreta de tareas; y estas tareas, al repetirse, constituían la serie discreta de los días.”*

*Extracto del libro “La posibilidad de una isla” de Michel Houellebecq*

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La investigación llevada a cabo en esta tesis nace de la pasión y el interés del autor por la arquitectura y, en concreto, por la evolución de esta disciplina en la nueva era tecnológica en la que vivimos, en la cual, la práctica profesional va siempre un paso por detrás de los avances científicos y se impone su actualización de forma continua.

En el año 2006, el autor funda el estudio profesional Quark arquitectos, estudio de arquitectura y Biodomótica S.L., empresa que obtiene el premio *Spin off* de la Universidad de Málaga el mismo año por su carácter innovador en el sector de la arquitectura y la construcción. La innovación introducida por el estudio profesional con la Biodomótica consiste primordialmente en la interacción de las nuevas tecnologías de automatización y control con soluciones constructivas vernáculas o tradicionales.

La autoría de esta nueva disciplina se protege con la denominación de “Biodomótica” en el Registro General de Protección Intelectual en el año 2008 y como continuación de su investigación, en el año 2011 el autor obtiene el título del Máster universitario en Medio Ambiente y Arquitectura Bioclimática por la Universidad Politécnica de Madrid, con la tesina “La casa Biodomótica”.

En los últimos años, la trayectoria del autor se ha caracterizado por la práctica profesional en este campo de interacción entre sistemas tecnológicos activos y la arquitectura pasiva. Esta tesis recoge la investigación realizada mediante casos prácticos de proyectos experimentales y de obras ejecutadas.

En la actualidad la Biodomótica adquiere aún mayor relevancia para la consecución de arquitectura sostenible o de bajo impacto ambiental, dada la importancia de la huella ecológica de las construcciones.

### 1.2 Evolución histórica de la arquitectura.

La arquitectura se remonta a la misma existencia del hombre. La necesidad de cobijo aparece como un elemento ligado a la supervivencia del ser humano ante las amenazas a las que se

enfrenta en su evolución como especie. Nace como refugio frente a las inclemencias meteorológicas y defensa ante el ataque de otras especies.

Si se hace un repaso por la historia de la humanidad se observa que, además de su fin principal, la arquitectura ha posibilitado otras necesidades vitales para nuestra especie: desde el culto a divinidades o antepasados en los periodos prehistóricos, al carácter defensivo y militar en los primeros asentamientos donde se conforma la civilización, como símbolo del poder de los primeros imperios y religiones o incluso como representación mediante su belleza y proporciones en la Edad Media y la Edad Moderna.

En la Fig. 1.1 se puede observar el santuario Göbekli Tepe, uno de los lugares de culto religioso más antiguos descubiertos en excavaciones arqueológicas. Con una antigüedad de más de 10.000 años, se puede apreciar distintas artes constructivas tales como muros de piedra en forma circular y pilares monolíticos con motivos sagrados.

El origen de la arquitectura puede ser la caverna o las cuevas horadadas, pero con el paso al nomadismo del hombre y posterior necesidad de conformar asentamientos relativamente estables, en las construcciones se empiezan a emplear otros materiales fácilmente transformables tales como ramas, pieles, huesos o piedras. Existen vestigios de estos materiales en antiguos asentamientos prehistóricos y son prueba de las primeras arquitecturas de las que se tiene constancia.

El empleo de estas materias primas y posterior aparición de materiales transformados como los adobes y morteros ha permitido que el arte de la construcción se vaya tecnificando desde la antigüedad hasta nuestros días.

Esta evolución natural de la arquitectura lleva aparejada en todo momento la interacción con su entorno inmediato, el conocimiento de la orografía y la climatología del lugar donde se va a levantar la edificación. Es aquí donde surge la necesidad de construir con los recursos disponibles a nuestro alcance para obtener los espacios más acordes para la vida. Esta dualidad conforma lo que se conoce como arquitectura bioclimática, entendida como una arquitectura que emplea los menores recursos del entorno para obtener un espacio confortable para el usuario final o, dicho de otro modo, la arquitectura que, empleando los recursos climáticos y los materiales del entorno, permite la vida y el confort de las personas.

Otro de los factores que caracteriza la arquitectura bioclimática es el ahorro de energía en todo el proceso edificatorio; y esto se obtiene con el empleo de materiales autóctonos para evitar gastos energéticos de extracción y transporte, el empleo de técnicas constructivas que ahorren recursos y tiempos de construcción, así como estrategias pasivas de diseño y el uso de energías renovables para cubrir las necesidades de climatización. Esta forma de construir lo observamos en todas las culturas: en Grecia, en Roma, en la arquitectura árabe, en la cultura Mesoamericana o la Oriental. Desde la antigüedad, los arquitectos han empleado estrategias de diseño orientadas a la adaptación orográfica y climatológica de los edificios y



el uso de materiales autóctonos para poder construir de forma eficaz, económica y comfortable.



Fig. 1.1 Santuario Göbekli Tepe. Turquía. Complejo Magalítico, periodo Neolítico (X milenio a.C). Beytullah Eles 2019. Dominio público, recuperado en [https://es.wikipedia.org/wiki/G%C3%B6bekli\\_Tepe](https://es.wikipedia.org/wiki/G%C3%B6bekli_Tepe).

Podemos apreciar estas estrategias en ejemplos magistrales de arquitectura bioclimática presentes en toda la Geografía. Entre otros, algunos de los más reconocidos son la Alhambra de Granada, donde el empleo de fuentes y vegetación permite refrescar el ambiente mediante la absorción del calor de vaporización del agua (Fig. 1.2), las torres de viento de Yazd en Irán, elementos constructivos que captan las corrientes de aire fresco para refrigerar y ventilar los espacios interiores (Fig. 1.3), o las termas de Caracalla en Roma cuyo pavimento estaba conformado por un sistema de canalizaciones de aire llamado hipocausto que permitía el paso del humo de combustión de las calderas para calefactar el suelo. Un ejemplo del sistema de pavimento radiante por hipocausto bien conservado lo tenemos en el yacimiento romano de la Villa de la Olmeda, en Pedrosa de la Vega, Palencia (Fig. 1.4).

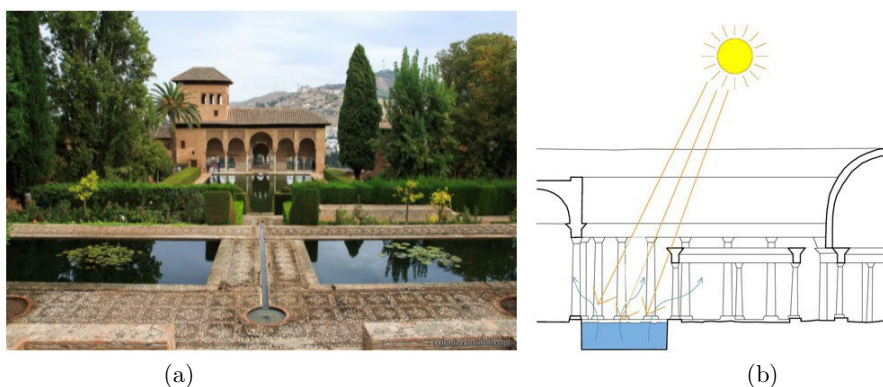


Fig. 1.2 a) Alhambra, refrescamiento mediante láminas de agua. Granada (España). Recuperado en <https://jardinessinfronteras.com/2020/02/12/el-jardin-en-la-tradicion-islamica>, b) Esquema de funcionamiento de refrescamiento mediante lámina de agua.

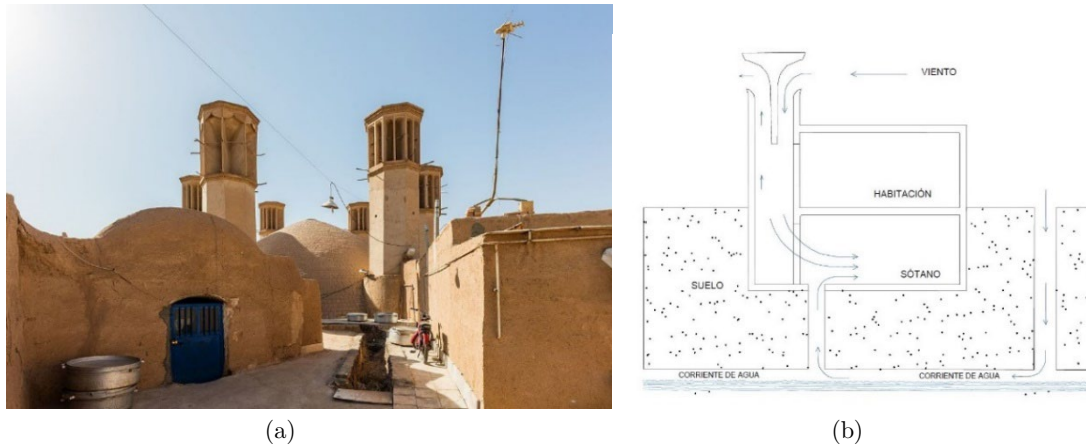


Fig. 1.3 a) Shish Badgiri, Yazd, Irán. Torres de viento para ventilación y refrigeración natural de los edificios y evacuación de aire caliente en verano. Diego Delso (2016). Creative Commons, dominio público recuperado en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Captador\\_de\\_viento#/media/Archivo:Shish\\_Badgiri,\\_Yazd,\\_Ir%C3%A1n,\\_2016-09-21,\\_DD\\_01.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Captador_de_viento#/media/Archivo:Shish_Badgiri,_Yazd,_Ir%C3%A1n,_2016-09-21,_DD_01.jpg), b) Esquema de funcionamiento de torre de viento.

A mediados del siglo XVIII, la Revolución Industrial implica la transformación social, industrial y tecnológica de la sociedad. Con esta Industria 1.0 deviene una nueva concepción de la arquitectura y las obras de ingeniería. Con la industrialización y el procesado de nuevos materiales como los metales o el hormigón se relevan la madera o la piedra en la construcción y aparecen nuevos materiales sintetizados, más agresivos y contaminantes. La posibilidad de transportar estos materiales a largas distancias con los incipientes medios de transporte mecanizados deriva en una inconsciencia generalizada y en el abuso de energías procedentes de combustibles fósiles.

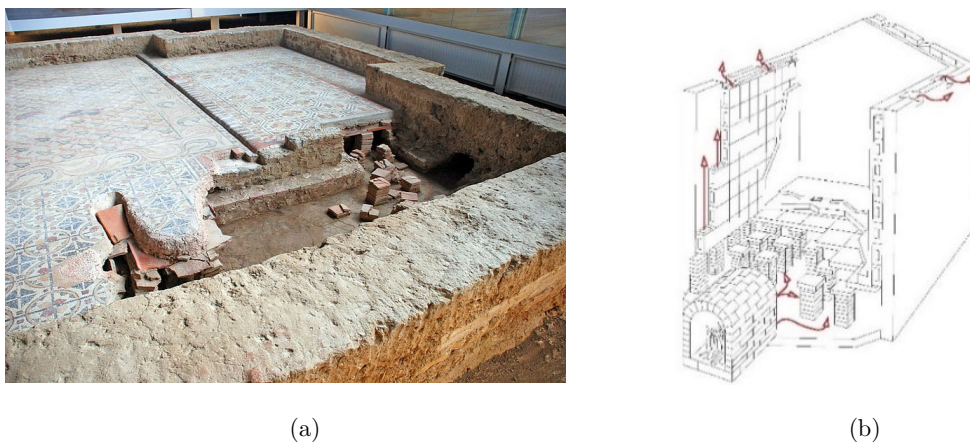


Fig. 1.4 a) Villa romana de la Olmeda, Pedrosa de la Vega (Palencia) sistema de calefacción del suelo mediante el hipocausto. Recuperado en <https://franciscojaviertostado.com/2015/04/27/el-ingenio-de-un-genio-romano/>, b) Esquema de salida de humos de combustión.

Todo esto sumado a nuevos sistemas de calefacción y refrigeración artificial y el consumo del petróleo, del carbón y gas, originan elevadísimas emisiones de CO<sub>2</sub>, con los consecuentes problemas medioambientales: calentamiento global, contaminación atmosférica y un planeta en continuo conflicto por la dependencia económica de sus recursos fósiles; siendo todo ello uno de los principales problemas a los que se enfrenta la humanidad en la sociedad contemporánea.

En la actualidad, siendo conscientes de la problemática medioambiental que además se incrementa con la superpoblación y nuestra forma de vivir contemporánea, podemos decir que nos hemos visto obligados a emprender un nuevo camino científico y social para la reparación y restitución del daño ambiental. Tras siglos de historia en la que se han ido depurando las técnicas constructivas con el aprendizaje de metodologías y soluciones precursoras, estamos en un momento donde el desarrollo técnico y científico de las últimas décadas está transformando la arquitectura de una forma exponencial. El avance de distintas áreas científicas en el campo de las telecomunicaciones, de la informática, las nuevas tecnologías y la inteligencia artificial empiezan a cambiar nuestra forma de proceder en lo que podemos definir una nueva Revolución Ecológica y Digital. La industria 4.0 o la cuarta revolución industrial se fundamenta en parte en esta idea.

Tras la industrialización y mecanización de los procesos lo que se conoce como la industria 2.0, la implantación de la electricidad como principal energía en la industria y la automatización de ésta en el siglo XX en la llamada industria 3.0, la cuarta etapa en la que estamos inmersos es la revolución digital de la industria o la industria inteligente.

Cada etapa del desarrollo industrial ha condicionado la arquitectura de una u otra forma. En la Fig. 1.5 se representa uno de los edificios más emblemáticos de la influyente escuela Bauhaus; diseñado por Walter Gropius en el año 1925, en su imagen y en los materiales empleados en su construcción se puede observar como ya a principios de siglo XX el concepto de industrialización de la arquitectura influye en la concepción de la misma. En esta obra el predominio del muro cortina o fachada acristalada y la combinación de estructuras metálicas y de hormigón armado confieren una imagen industrial al edificio.



Fig. 1.5 Escuela Bauhaus en Dessau en Alemania, Walter Gropius. El uso del acero, vidrio y el cemento en la arquitectura de inicios del s.XX Recuperado en: [https://www.tendencias hoy.com/arte/arquitectura/un-siglo-de-la-bauhaus-en-seis-edificios-alrededor-del-mundo\\_591911\\_102.html](https://www.tendencias hoy.com/arte/arquitectura/un-siglo-de-la-bauhaus-en-seis-edificios-alrededor-del-mundo_591911_102.html).

Otro edificio emblemático altamente influenciado por la industrialización es el Centro Pompidou (Fig. 1.6). Perteneciente al movimiento *High-Tech* y diseño de los arquitectos



Richard Rogers y Renzo Piano (1977), es uno de los símbolos del movimiento tardo modernista en el que la tecnología, la prefabricación y los elementos constructivos e instalaciones vistas en fachada crean la identidad del edificio.



Fig. 1.6 Centro Pompidou, París (Francia), Richards Rogers y Renzo Piano. Emblema del movimiento High-Tech donde se realiza la tecnología detrás de la arquitectura. Recuperado en <https://es.parisinfo.com/donde-salir-por-paris/info/guias/exposicion-en-el-centre-pompidou>.

Hoy en día, los avances en inteligencia artificial (AI), tecnologías de la información (IT), el *IoT* (Internet de las cosas), la domótica y el control inteligente hacen que podamos interactuar con nuestras viviendas y edificios de una forma en la que no lo habíamos hecho antes. Estas nuevas aplicaciones, aparte de facilitar la vida de los usuarios, permiten optimizar los recursos energéticos y tener un control sobre cada elemento de nuestras construcciones.

Gracias a estas nuevas tecnologías, la arquitectura ha adquirido una nueva dimensión. A los beneficios ya conocidos de la arquitectura pasiva o bioclimática se le añade la posibilidad de automatizar sus elementos constructivos, la integración de energías renovables, o el control de las instalaciones para obtener los niveles de confort deseados. Todo ello sumado a las soluciones del *IoT* que en la actualidad facilitan la interacción con los electrodomésticos y sistemas de nuestras viviendas a través de internet, acaban conformando lo que se conoce como “edificio inteligente”. Es el paso de un edificio que consume energía en su vida útil, a uno que es capaz de reducir este consumo a la vez que aporta confort y facilita la vida a sus usuarios.

Actualmente existen muchos estudios sobre estas soluciones y, a medida que aparecen nuevos retos en la era digital, aumentan las posibilidades; un ejemplo son los estudios de **Machorro-Cano et al. (2020)** que presentan un sistema de gestión inteligente del hogar denominado *HEMS-IoT* que basado en la tecnologías del *IoT*, la obtención de datos mediante *Big Data* y soluciones de aprendizaje mediante algoritmos (*Machine Learning*), es capaz de aprender y automatizar procesos de las viviendas para la reducción del consumo de energía. Otro estudio de **Paredes Valverde et al. (2019)** presentan IntelliHome, un

sistema de seguimiento y control del consumo energético en viviendas que proporciona recomendaciones de ahorro energético mediante recopilación de datos (*Big Data*) de los hábitos de los usuarios.

En otro estudio de **Moniruzzaman et al. (2020)** se demuestra la importancia de la seguridad y protección de datos en estos nuevos edificios inteligentes, siendo los nuevos avances de estructuras de datos en cadenas de bloques (*Block Chain*) y las técnicas criptográficas, soluciones necesarias a implementar en las viviendas.

### 1.3 Biodomótica

Según los datos de la Agencia Internacional de la Energía, mostrados en la Fig. 7, el consumo de energía en el sector de la construcción es el responsable de más del 30% de la energía consumida en todo el mundo y en torno al 28% de las emisiones nocivas. Los objetivos actuales de la Comisión Europea requieren la construcción de edificios más eficientes energéticamente limitando el consumo energético y las emisiones contaminantes al medio ambiente, considerados como consumidores netos de energía cero o edificios de consumo energético casi nulo (EECN), *nZEB* (*Nearly Zero Building Energy* en sus siglas en inglés). (**Directiva 2018/844/UE; Directiva 2018/2001/UE; Directiva 2018/2002/UE**)

En respuesta a estas nuevas necesidades y planteamientos globales en asuntos de sostenibilidad edificatoria, se entiende la Biodomótica como la integración de soluciones bioclimáticas, energías renovables y sistemas tecnológicos de automatización y control en la concepción de estos nuevos edificios de bajo consumo.

Como ya se ha mencionado, la arquitectura bioclimática es aquella que produce un beneficio al edificio, a la obra de ingeniería o a su entorno, que por un lado reduce la contaminación y el consumo de energías no renovables y por otro, aporta confort a los usuarios de este. Para ello, esta arquitectura se aprovecha de las propiedades físicas de los materiales, de la orientación de sus paramentos respecto a la trayectoria solar y los vientos predominantes, así como de las características morfológicas y climatológicas del entorno para fijar su estrategia de diseño.

La domótica es el conjunto de sistemas para la automatización, control y gestión inteligente de un edificio. Un sistema domótico permite una comunicación directa del usuario con las instalaciones de la vivienda. El sistema recibe la información mediante sensores de entrada, la procesa y transmite una orden a los actuadores o elementos de salida.

Teniendo en cuenta ambos conceptos, la Biodomótica se entiende como un conjunto de soluciones domóticas aplicadas para fines sostenibles en edificación con el objetivo de optimizar la eficiencia energética de un edificio y mejorar el nivel de confort de sus usuarios.

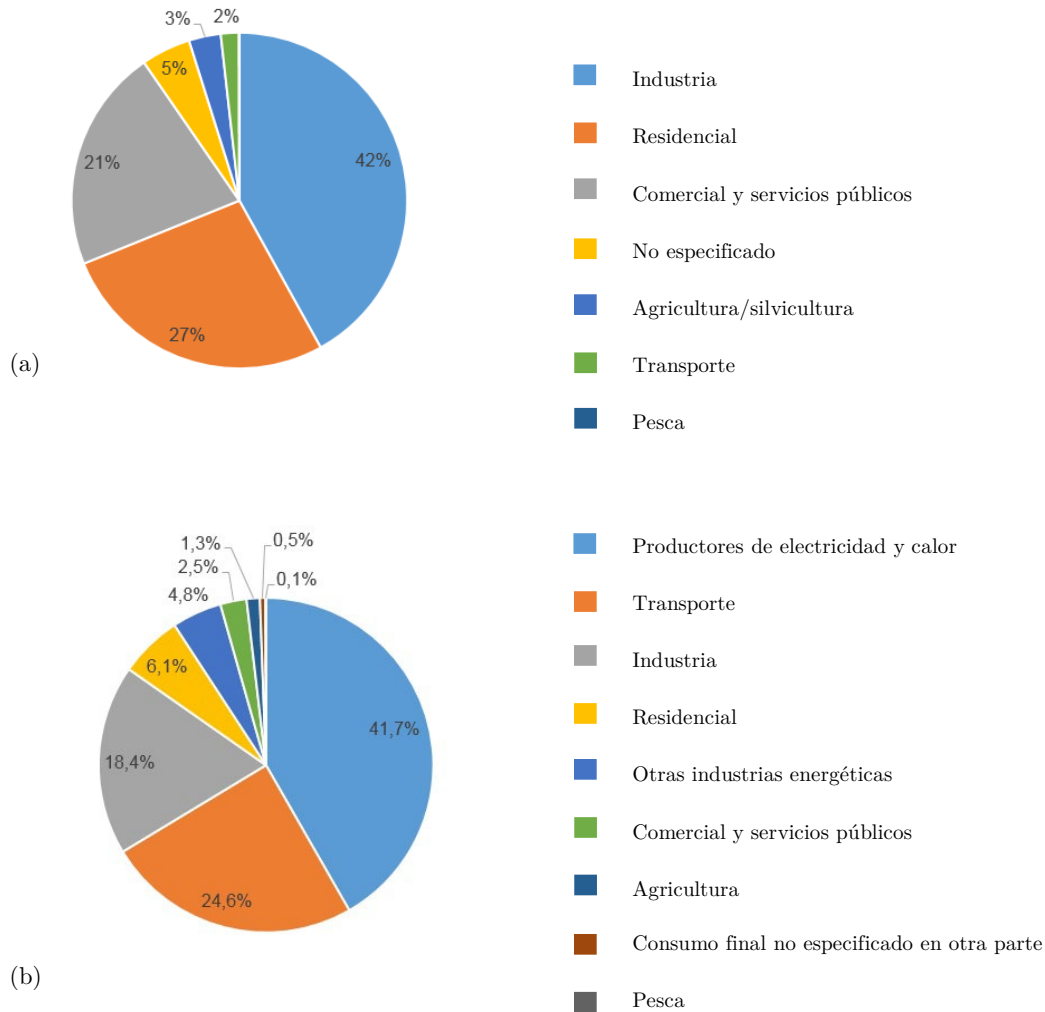


Fig. 1.7 (a) Consumo final de electricidad y (b) emisiones de CO<sub>2</sub> por sectores en 2018, fuente Agencia Internacional de la Energía.

Analizando el estado de la cuestión, el estudio realizado por **Andrés Soto (2018)** muestra las estrategias bioclimáticas a la hora de diseñar edificios de Consumo Energético casi nulo o *nZEB*. Se hace referencia a varias soluciones pasivas tales como la ventilación natural, el enfriamiento evaporativo, materiales de cambio de fase o *PCM* (del inglés *Phase Change Materials*) o el diseño de la envolvente. Estas soluciones se adoptan en el proceso de diseño para optimizar el confort, las demandas de climatización y la calidad del aire interior y requieren de cálculos informáticos complejos basados en simulaciones *CFD* (del inglés *Computational Fluid Dynamics*).

Existe un alto potencial de medidas de ahorro energético a considerar en los edificios que pueden mejorar la eficiencia energética. **Belussi et al. (2019)** describen el proceso de diseño *nZEB* como una metodología que busca minimizar la demanda térmica del edificio, mejorar la eficiencia energética de los sistemas activos e incorporar energías renovables.

Por otro lado, en diversas investigaciones se analizan y desarrollan soluciones constructivas e integración de sistemas renovables que favorecen las mejoras energéticas de los edificios.

**Zhai et al. (2011)** estudian distintas variantes de chimeneas solares como solución pasiva a considerar en los edificios para reducir las ganancias de calor e inducir enfriamiento o calefacción natural a la vez que se optimiza la ventilación natural. En este estudio analizan las mejoras de rendimiento obtenido con la combinación de estas estrategias en un mismo edificio, implementando soluciones de preenfriamiento previo del aire o sistemas activos para mejorar la velocidad de flujo de aire de entrada. **Özbalta et al. (2010)** estudian los ahorros energéticos de calefacción debidos al sistema de muro Trombe integrado en las fachadas de los edificios, en función de distintos materiales usados en su construcción. Obtienen resultados muy interesantes dependiendo del material del sistema constructivo y el color del acabado, y constatan la viabilidad de este sistema para obtener ganancias de energía mediante fuentes renovables como puede ser la energía solar y a un coste reducido. **Feng et al. (2014)** estudian el comportamiento energético de un edificio con cubierta vegetal, verificando las bondades de la vegetación en el ahorro de energía, en la reducción del flujo de calor y la reflectividad solar, la generación de enfriamiento evaporativo, así como la mejora en el rendimiento térmico de la envolvente del edificio. Los resultados obtenidos demuestran los beneficios y reducción de las demandas de refrigeración del edificio, así como la reducción de las ganancias de calor a través de la envolvente en el periodo de verano.

Los edificios de bajo consumo energético basan su eficiencia principalmente en una exigente estanqueidad y aislamiento de la envolvente para reducir su demanda de climatización. La implementación en estos edificios de equipos de generación de energía eléctrica o térmica mediante energías renovables, el uso de materiales, soluciones constructivas, instalaciones eficientes, la implementación de sistemas de control de los mismos, y otras soluciones de ahorro mediante los avances en tecnologías de gestión y monitorización, son la base de trabajo de esta investigación como solución a la problemática energética en el sector de la edificación y de forma paralela reducir la generación de residuos y contaminación ambiental.

La optimización de la envolvente del edificio es un factor clave para reducir la demanda térmica del mismo, y el aislamiento juega un papel importante en su rendimiento energético. Para limitar el consumo de energía, la mayoría de los códigos y normas de edificación regulan y limitan el valor de la transmitancia térmica de la envolvente según el tipo de edificio y zona climática **Atanasiu et al. (2016)**.

**D'Agostino et al. (2019)** analizan la influencia energética y económica del aislamiento térmico exterior aplicadas a diferentes grosores y paramentos para un caso de estudio de un edificio de oficinas en tres emplazamientos climáticos distintos. Mediante el uso de simulaciones energéticas en condiciones dinámicas con el software *DesignBuilder*, las conclusiones del estudio son muy interesantes en cuanto a la observación de menor necesidad de aislamiento en climas cálidos, llegando a ser incluso contraproducente éste a partir de ciertos espesores, y la mayor necesidad del aislamiento para climas fríos, optimizándose los comportamientos térmicos con mayores espesores en toda la envolvente.

En otro estudio, **Braulio-Gonzalo et al. (2017)** analizan el material aislante óptimo y el espesor del mismo sobre la envolvente del edificio desde el punto de vista de la demanda térmica, del análisis del ciclo de vida y del coste en una vivienda unifamiliar en España. En este trabajo se concluye que nuevos materiales aislantes ecológicos como la lana de oveja y el algodón reciclado contribuyen favorablemente al nivel de aislamiento a bajo coste y son una solución ideal para la reducción de la demanda de energía con un bajo impacto ambiental.

Como alternativa a los materiales aislantes habituales, el uso de Paneles de Aislamiento al Vacío (*VIP* de sus siglas en inglés *Vacuum Insulation Panel*) está creciendo continuamente porque su resistencia térmica puede ser diez veces mayor con un espesor comparable. Respecto a esta última propuesta, **Uriarte et al. (2019)** implementan soluciones integrales de renovación basadas en *VIP* en dos edificios terciarios en Suecia y España con buenos resultados térmicos, y **Khalor et al. (2020)** recomiendan a los agentes del proceso constructivo que consideren *VIP* en su diseño como alternativa a otros materiales convencionales, siempre que se lleve a cabo una inspección adecuada durante la instalación.

Por otro lado, el uso de recursos naturales es una medida eficaz para reducir la demanda térmica en edificios y es muy importante para lograr una edificación sostenible; por ejemplo, la integración de técnicas de calefacción pasiva como los colectores solares de aire, que aprovechan la energía del sol para calentar el aire en los edificios. Existen diferentes tipos de colectores solares de aire según el método de mejora del rendimiento térmico o la aplicación: secado, calentamiento del aire exterior, etc. **Hu et al. (2019)**. Además, otros autores han caracterizado los colectores solares de aire con diferentes modelos numéricos, a partir de modelos simplificados validados con pruebas experimentales e implementados en programas de estudio térmico típicos como *EnergyPlus* **Yu et al. (2019)**, hasta modelos más detallados con simulaciones *CFD* en un análisis de rendimiento térmico más profundo **Potgieter et al. (2020)**.

En ese sentido, los trabajos de **Ellis (2003)**, para el caso del muro Trombe sin ventilación, y **Chao et al. (2020)**, para el caso del colector de aire solar multisuperficie con doble tubo receptor, se basan en simulaciones con *EnergyPlus* utilizando ecuaciones de flujo de ventilación natural y transferencia de calor obteniendo resultados interesantes donde se han validado los datos experimentales respecto a modelos reales.

Un ejemplo típico de la aplicación de un colector solar para calentar aire es estudiado por **Agathokleous et al. (2019)**, donde presentan el análisis de un nuevo colector solar de aire de placa plana integrado en fachada con interesantes resultados energéticos y de confort, así como un tiempo de amortización razonable.

Existen también un número significativo de tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia energética de los sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (*HVAC*) de acuerdo con diferentes factores: el uso de sistemas de control inteligente y la integración de



energías renovables en sustitución de los sistemas de fuentes de energía convencionales con combustibles fósiles, como objetivo prioritario en edificaciones sostenibles y eficientes.

La gestión del comportamiento de los ocupantes del edificio ha sido recientemente objeto de estudio analizando cómo influye en el consumo energético del mismo. **Aguilera et al (2019)** implementan un control impulsado por la demanda basado en la experiencia de los usuarios y concluyen con la importancia de considerar la renovación constante de datos, mediciones precisas del clima interior del local y la expectativa térmica de los ocupantes.

Las posibilidades de integrar energías renovables en un edificio son muy numerosas. Cabe señalar que recientes estudios describen un desarrollo importante de la modificación de fachadas modulares con tecnologías de energía renovable en Europa (*MFRRn* de sus siglas en inglés *Modular facade retrofit with renewable energy technologies*). El *MFRRn* se refiere al proceso de reacondicionamiento en el que se integran tecnologías de aislamiento térmico, energía solar y eólica con el acabado exterior del edificio mediante un enfoque modular **Du et al. (2019)**.

Otro ejemplo de integración de energía renovable en *nZEB* lo llevan a cabo **Harkouss et al. (2019)** con una comparación de seis conjuntos de soluciones de energía renovable para diseñar *nZEB* en tres climas diferentes para agua caliente sanitaria (ACS), calefacción, refrigeración y producción de electricidad. En el estudio se constata la importancia de la elección de las energías renovables para la consecución de *nZEB* en los distintos climas, obteniendo la combinación de bomba de calor para refrigeración y colectores solares para ACS, como solución más idónea en clima cálido, un generador de electricidad mediante combustible biodiesel para el clima frío y el empleo de gas natural como combustible en climas mixtos.

En un reciente estudio, **Las Heras-Casas et al. (2018)** presentan la implementación de calderas de biomasa en España, donde actualmente se utiliza biomasa para calefacción y ACS, con consumos de 2,1 Mtep al año. Se realizó un análisis energético, ambiental y económico que mostró cómo se puede lograr una reducción del 93% en el consumo de energía primaria no renovable con estos sistemas.

Existen multitud de estudios en el campo de la automatización de elementos constructivos o implementación de generadores de energía renovables para edificios inteligentes. **Attia, S. (2017)** realiza un estudio detallado de una fachada dinámica adaptativa que optimiza la captación - protección solar y el control programado de sus elementos, en función de los niveles de confort exigidos en el espacio interior y la estacionalidad climática en las torres de oficinas Al Bahr Towers, en Dubai. En este trabajo se analiza el diseño, la construcción y la monitorización de variables climáticas, contrastando la efectividad de este tipo de fachadas inteligentes que buscan los beneficios de la captación solar dependiendo de las condiciones climáticas exteriores y en cada momento del día, con la consecuente optimización de los sistemas de climatización, ventilación, iluminación y en definitiva el confort de los usuarios.

Otras soluciones de automatización en la construcción de viviendas de bajo consumo estancas las encontramos en las instalaciones de estos edificios inteligentes. Los sistemas de ventilación forzada para renovar el aire interior de los espacios, además de posibilitar las necesidades de ventilación, permiten mejorar la calidad de aire interior y detectar la saturación del mismo por compuestos orgánicos volátiles (COV), exceso de CO<sub>2</sub>, polvo o polen presente en el ambiente. Estos sistemas han ido paulatinamente tecnificándose y actualmente existen modelos que incorporan filtros, sensores y cuadros de mando inteligentes, así como recuperadores de calor de alto rendimiento para realizar un intercambio psicométrico entre el aire de extracción y el de ventilación, donde el aire viciado del interior transfiere calor al aire fresco y limpio del exterior (Zehnder, 2021).

Con todo lo descrito, una primera aproximación al concepto de Biodomótica lo encontramos en el proyecto experimental de una vivienda diseño de Ghoreishi y Casado (2006) en Granada. Esta vivienda se concibe sobre una balsa de agua de riego que permite su refrigeración en periodos estivales aplicando criterios bioclimáticos. Con aberturas estratégicas que facilitan el movimiento del aire por convección, la vivienda se refrigera y se calienta mediante un sistema inteligente que permite el control y la regulación automática de compuertas y elementos constructivos en los distintos periodos estacionales. Se establecen unos parámetros de confort interior y el sistema regula la apertura de las compuertas de entrada de aire y la orientación de las lamas móviles de una pérgola.

Se optimiza así el funcionamiento en verano y en invierno de la casa con la combinación de soluciones bioclimáticas tradicionales y tecnologías de control inteligente. En la Fig. 1.8 se observa el esquema del funcionamiento biodomótico de la vivienda, donde el control sobre las aberturas de ventilación y los elementos de protección solar permiten un comportamiento óptimo según la estación del año.

En otro proyecto experimental en Málaga, los mismos autores diseñan una vivienda pasiva con cerramientos estructurales de adobes en una parcela con orientación norte. La deficiente captación solar debido a la orientación hace necesario la optimización del aislamiento en la envolvente, la incorporación de soluciones de automatización y control domótico de los elementos constructivos: accionamiento de las protecciones solares (estores automatizados), la apertura de ventanas y aberturas según las necesidades climáticas, así como un equipo de ventilación forzada con recuperación de calor.

En función de la actividad de los usuarios y las cargas térmicas interiores, la vivienda regula de forma autónoma el flujo de aire a renovar y las necesidades de captación solar buscando el confort de los espacios interiores. Los estudios mediante simulación energética verifican que con las mejoras introducidas se obtienen valores inferiores a los 15 kWh/m<sup>2</sup> (año) de demandas de climatización y un sobrecalentamiento global del edificio en verano inferior al 10%, requisitos predefinidos para las viviendas pasivas según la certificación del reconocido instituto alemán *Passivhaus Institut*. En la Fig. 1.9 se representan las estrategias de verano e invierno de la vivienda.

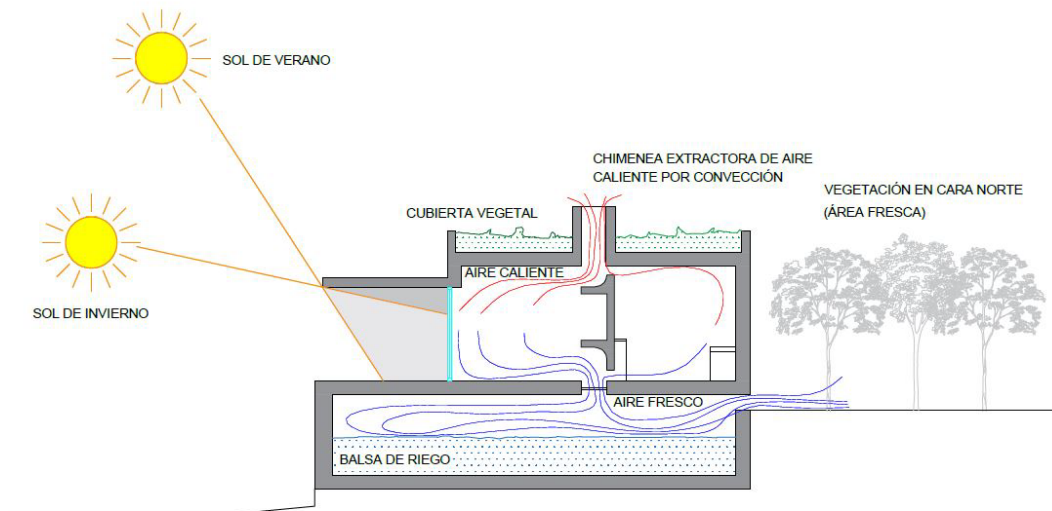


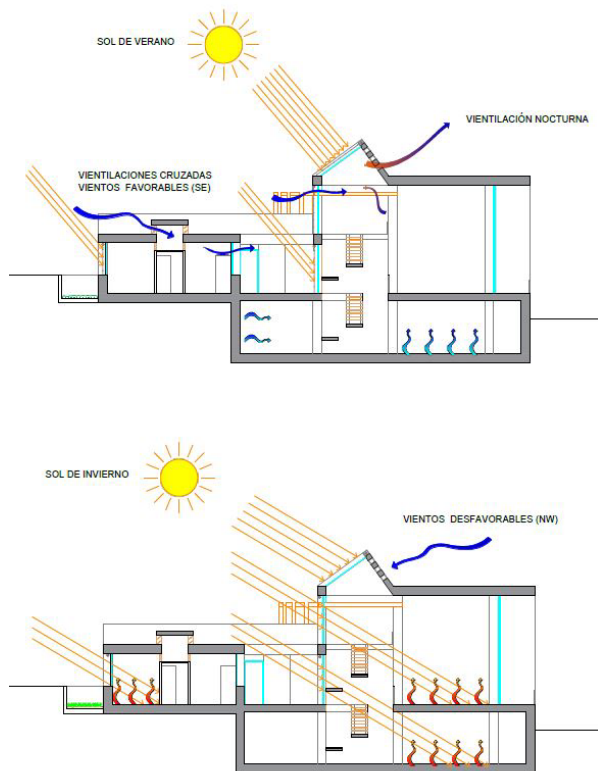
Fig.1.8 Proyecto de vivienda Biodomótica en Vicar (Almería). Ghoreishi-Casado (2006). Esquemas de funcionamiento de la vivienda. Fuente propia.

En verano las protecciones solares automatizadas evitan el sobrecalentamiento de los espacios interiores y a su vez, el control inteligente de la vivienda regula la abertura de rejillas que captan los vientos favorables del Sureste y posibilita la ventilación nocturna de los espacios. En invierno se optimiza la máxima captación solar con la apertura de los estores automatizados y la vivienda aprovecha este calor captado en los cerramientos y pavimentos con materiales de alta inercia térmica potenciando una calefacción natural.

La protección de los vientos desfavorables del Noroeste, el aislamiento de la envolvente, la estanqueidad, y la ventilación mecánica de doble flujo completan el funcionamiento biodomótico de la vivienda. En la Fig. 1.10 se observan los resultados de la simulación energética de la vivienda, donde todos los parámetros de demandas de climatización, estanqueidad y sobrecalentamiento de la vivienda resultante permiten que la vivienda sea de calificación energética A, con un bajo índice de emisiones de CO<sub>2</sub> ambiental.

Además de la certificación **Passive House Institute [PHI] (2021)**, en la actualidad existen diversos indicadores y estándares que evalúan y certifican una construcción que cumple estos requisitos de sostenibilidad, eficiencia y confort, así como otros criterios como la eficiencia en el uso del agua, la salubridad y la calidad de aire, o los residuos generados en los procesos edificatorios. (**Leadership in Energy and Environmental Design [LEED], 2021; Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology [BREEAM], 2021; VERDE, 2021**)

# BIODOMÓTICA: OPTIMIZACIÓN DE LA ARQUITECTURA PASIVA MEDIANTE EL USO DE LAS TECNOLOGÍAS DE CONTROL INTELIGENTE Y AUTOMATIZACIÓN



## VERANO

Esquema de soleamiento

Protección solar mediante estores automatizados

Aprovechamiento inercia térmica del terreno

Esquema de ventilación cruzada diurna

Ventilación nocturna

## INVIERNO

Esquema de soleamiento

Aprovechamiento inercia térmica del pavimento y cerramientos

Esquema de ventilación mediante ventilación controlada

Fig.1.9 Casa Biodomótica en Alhaurín. Esquema de funcionamiento en verano e invierno. Fuente propia.

Building:	Casa Alhaurin Q-ark		
Location and Climate:	Mediterraneo	Málaga	
Street:	C/ Campillos, parcela 568-A, Urbanización Pinos de Alhaurin		
Postcode/City:			
Country:	España		
Building Type:	unifamiliar aislada		
Year of Construction:	2011		
Number of Dwelling Units:	1		
Enclosed Volume V <sub>e</sub> :	953,0	m <sup>3</sup>	
Number of Occupants:	4,0		
Interior Temperature:	20,0	°C	
Internal Heat Gains:	2,1	W/m <sup>2</sup>	
Specific Demands with Reference to the Treated Floor Area			
Treated Floor Area:	222,6	m <sup>2</sup>	
Applied:	Monthly Method	PH Certificate:	Fulfilled?
Specific Space Heat Demand:	15 kWh/(m <sup>2</sup> a)	15 kWh/(m <sup>2</sup> a)	Yes
Pressurization Test Result:	0,6 h <sup>-1</sup>	0,6 h <sup>-1</sup>	Yes
Specific Primary Energy Demand (DHW, Heating, Cooling, Auxiliary and Household Electricity):	kWh/(m <sup>2</sup> a)	120 kWh/(m <sup>2</sup> a)	
Specific Primary Energy Demand (DHW, Heating and Auxiliary Electricity):	kWh/(m <sup>2</sup> a)		
Specific Primary Energy Demand Energy Conservation by Solar Electricity:	kWh/(m <sup>2</sup> a)		
Heating Load:	8 W/m <sup>2</sup>		
Frequency of Overheating:	0 %	over 25 °C	
Specific Useful Cooling Energy Demand:	kWh/(m <sup>2</sup> a)	15 kWh/(m <sup>2</sup> a)	
Cooling Load:	3 W/m <sup>2</sup>		

Fig.1.10 Casa Biodomótica en Alhaurín. Comportamiento térmico de la vivienda obtenido mediante software de simulación energética EnergyPlus.

## 1.4 Confort térmico y bienestar en edificios. Contaminantes físicos y químicos

Existe un alto potencial de medidas de ahorro energético a considerar en los edificios que pueden mejorar su eficiencia energética, pero en la actualidad no solo se requiere una alta

eficiencia energética en las nuevas construcciones, sino que se les exige que sean respetuosos con el medio ambiente, además de confortables y saludables para sus habitantes, como se especifica en las normas europeas (**Directiva 2010/31/UE; Directiva 2018/844/UE**). Los ahorros de energía logrados en un edificio de consumo energético casi nulo deben cumplir con altos niveles de calidad ambiental interior *IEQ* (del inglés, *Indoor Environment Quality*), como resultado de confort térmico, visual, acústico y calidad de aire interior *IAQ* (del inglés, *Indoor Air Quality*)

El confort térmico está definido por la norma ASHRAE 55 (**ANSI/ASHRAE, 2017**) e ISO 7730 (**ISO 7730, 2005**), y está influenciado por diferentes factores: la velocidad del aire, la temperatura media radiante, la humedad, la vestimenta y la actividad de los usuarios. Los estándares europeos especifican los criterios de diseño para la *IEQ* y *IAQ*, así como los valores de entrada para los cálculos energéticos (**CEN EN Standard 16798-1, 2019; CEN EN Standard 16798-2, 2019**).

Para profundizar en el concepto de confort térmico se tiene que considerar que el ciclo vital del hombre comprende la ingesta de alimentos para transformarlos en energía que a su vez le permite realizar su actividad diaria. Parte de esa energía se transforma en calor para mantener la temperatura corporal de aproximadamente a 37°C. Esta temperatura, al ser más elevada que la del ambiente exterior, favorece un intercambio térmico constante con el entorno. El bienestar higrotérmico se establece cuando ese calor se pierde a una velocidad apropiada, a mayor velocidad, mayor será la sensación de frío, a menor velocidad, lo será la sensación de calor. Este fenómeno de intercambio energético entre el cuerpo y el entorno se produce a una velocidad a la que se denomina actividad del metabolismo y se cuantifica a través de la siguiente expresión:

$$1.1) \quad M = CV + R + EV$$

siendo  $M$  la actividad del metabolismo,  $CV$  el intercambio de energía por convección,  $R$  el intercambio de energía por Radiación y  $EV$  el intercambio por evapotranspiración. Existen otros fenómenos de menor valor que completarían la anterior ecuación, pero se consideran despreciables a efectos de un cálculo aproximativo de la actividad del metabolismo.

La transferencia de energía depende principalmente de la superficie de intercambio de la piel y la resistencia de los elementos intermedios como puede ser la ropa. De esta forma, la transferencia energética por radiación y convección puede ser negativa o positiva dependiendo de la temperatura del ambiente obteniéndose ganancias o pérdidas de calor, pero la evapotranspiración consistirá siempre en pérdidas de energía y actuará como un regulador térmico del organismo que ante temperaturas elevadas activa la exudación.

Así, el confort térmico describe la condición de la mente en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico. Para lograr esta satisfacción, la primera condición es la “neutralidad térmica”, es decir, que la persona no sienta ni demasiado calor ni demasiado frío. Calcular el confort térmico es una tarea difícil debido a que la magnitud es una

sensación subjetiva, ya que depende de los sujetos, sus actividades (trabajo, relajación, actividades, movimiento, etc.), del arropamiento y también de la medición de las variables del entorno como la temperatura, la humedad y el movimiento del aire.

La actividad metabólica del individuo se mide en una magnitud denominada *met*, equivalente a 50 kcal/h por metro cuadrado de superficie corporal ( $58,2 \text{ W/m}^2$ ), y se puede estimar en una superficie corporal estándar en 100 W cada *met*. En la Tabla 1.1 se observa el estándar de actividad metabólica según la actividad de las personas. Se puede observar que, para niveles de actividad baja, el cuerpo genera un calor corporal en torno a los 80W, mientras que cuando nos encontramos haciendo ejercicio muy intenso podemos llegar a generar hasta 500W.

ACTIVIDAD		VELOCIDAD DEL METABOLISMO		
		(W/m <sup>2</sup> )	(W)	(met)
00. Nula	Metabolismo basal	41/44	65/79	0,65/0,79
0. Mínima	Descansado	65	115	1,15
1. Baja	Actividad manual sentado. Ligeros desplazamientos (<1,0 m/s)	100	180	1,80
2. Media	Trabajos con brazos y piernas. Desplazamientos a velocidad moderada (1,0-1,5 m/s)	165	295	2,95
3. Alta	Trabajos intensos. Desplazamientos rápidos (1,5-2,0 m/s)	230	415	4,15
4. Muy alta	Trabajos muy intensos. Desplazamientos corriendo (>2,0 m/s)	290	520	5,20

Tabla 1.1 Actividad metabólica según la actividad.

La vestimenta es otro factor importante a la hora de estudiar el confort higrotérmico ya que la percepción de calor y frío depende de la ropa que lleve el usuario en un espacio. Este factor se mide por el coeficiente de transmisión térmica de la vestimenta y para simplificar su aplicación en los estudios de confort se utiliza la magnitud *clo*, unidad que equivale a una resistencia térmica de  $0,15 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ . Aunque esta unidad se puede aplicar a cada tipo de vestimenta se suele agrupar sus valores en niveles más simples que se muestran en la Tabla 1.2. Se puede observar que 0 clo corresponde con la medida del cuerpo desnudo mientras que 1,5 clo se supone ropa de abrigo pesada, como la que se usa para exterior en los países nórdicos en invierno.

			Medio	Rango
Nivel	0	Desnudos	(0 clo)	(0...0,3 clo)
Nivel	1	Ropa ligera	(0,5 clo)	0,3...0,7 clo)
Nivel	2	Ropa media	(1,0 clo)	(0,7...1,3 clo)
Nivel	3	Ropa pesada	(1,5 clo)	(más de 1,3 clo)

Tabla 1.2. Índice de arropamiento.

Otro parámetro importante para considerar en el estudio de bienestar es el vinculado a las condiciones de diseño interior. En la normativa española RITE, Reglamento de Instalaciones



Térmicas de los edificios, (**RD. 178/2021**) se establecen los siguientes valores medios para una persona con actividad metabólica sedentaria ( $1,2 \text{ met}$ ), con un grado de vestimenta de  $0,5 \text{ clo}$  en verano y  $1 \text{ clo}$  en invierno:

Estación	Temperatura operativa	Humedad relativa
	°C	%
Verano	23...25	45...60
Invierno	21...23	40...50

Tabla 1.3: Condiciones de diseño interiores. RITE.

Estos valores medios se ven afectados por otros parámetros como el sexo de los ocupantes, el tiempo de ocupación del espacio y también de la distribución irregular de temperaturas entre los paramentos del local. Este último factor, al igual que la temperatura del aire, es el responsable de insatisfacción térmica de los usuarios debido a paredes, suelos y techos a una temperatura porcentualmente distinta del resto de la estancia.

Todos estos parámetros en el estudio de un espacio o local nos permiten adoptar criterios de diseño para una correcta aproximación al confort térmico de los usuarios. Herramientas como los diagramas psicométricos y los climogramas permiten establecer estrategias de diseño bioclimático conociendo los parámetros climáticos y las necesidades de los usuarios. En estas gráficas se representan la temperatura, la humedad, la irradiación solar, la velocidad del aire e incluso se define una zona de confort que variará según la estacionalidad, el tipo de arropamiento o actividad. De esta forma, podemos establecer las necesidades de protección solar, ventilación, etc., para un determinado espacio.

La Fig. 1.11 representa un diagrama psicrométrico, y se ha empleado el modelo de confort del estándar **ASHRAE 55-2004**, usando *PMV* (del inglés *Predicted Mean Vote*). El confort térmico está basado en temperatura de bulbo seco, nivel de arropamiento (*clo*), actividad metabólica (*met*), velocidad del aire, humedad, y temperatura radiante media. Se asume que la temperatura radiante media en el interior es igual a la temperatura de bulbo seco. En edificios residenciales los ocupantes adaptan su arropamiento para adecuarse a la estación del año y se siente cómoda con velocidades de aire mayores, por lo que se tiene un rango de confort más amplio que en edificios con sistemas de climatización centralizados.

El gráfico de la Fig. 1.11 se ha realizado mediante la herramienta *Climate Consultant*, que es una plataforma gratuita basada en Java. Se trata de un software informático gráfico y muy sencillo de utilizar que permite a ingenieros y arquitectos comprender y analizar cualquier clima en cuestión.

El software utiliza datos climáticos anuales en formato *EPW*, los cuales contienen información climatológica de cada una de las 8760 horas que tiene un año completo. Estos datos son traducidos para ser representados en diferentes gráficas significativas.

La gráfica más avanzada e importante que aporta el software es el diagrama psicrométrico. En él, los puntos verdes del gráfico representan la temperatura y la humedad de cada una

de las 8760 horas del año. El software crea distintos perímetros para cada tipo de estrategia y lo muestra en el diagrama en distintos colores. Estos perímetros se consideran áreas óptimas para el uso de cada estrategia. El porcentaje de horas que quedan encerradas dentro de cada zona de estrategia da una idea relativa de las mejores estrategias a considerar.

Entre las distintas estrategias se encuentran: aprovechamiento de ganancias internas, aprovechamiento de inercia térmica, ventilación natural, ganancias solares en cerramientos, aprovechamiento de elementos de sombra en ventanas, refrigeración, calefacción, etc.

Analizando el diagrama se puede obtener la siguiente información para el caso de una vivienda ubicada en Málaga:

- El 21.3% de las horas tienen condiciones de confort.
- En el 42.1% del tiempo se puede alcanzar confort con ganancias internas, emisiones de calor de aparatos electrónicos, iluminación, cocina y ocupantes.
- En el 16.0% del tiempo se puede alcanzar confort con ganancias de calentamiento solar pasivo y masa térmica. La misma masa térmica sirve para garantizar el confort mediante refrigeración en el 4.1% de las horas.
- En el 12.1% del tiempo se requiere la protección solar de huecos.
- En el 18.0% del tiempo se requiere calefacción activa para los días más fríos del año.
- En el 7.2% del tiempo se requiere deshumidificación.
- En el 3.3% del tiempo se requiere enfriamiento activo. Potenciando la masa térmica y la ventilación y con unas tolerancias ligeramente mayores a las del estándar, se puede suprimir el enfriamiento activo.

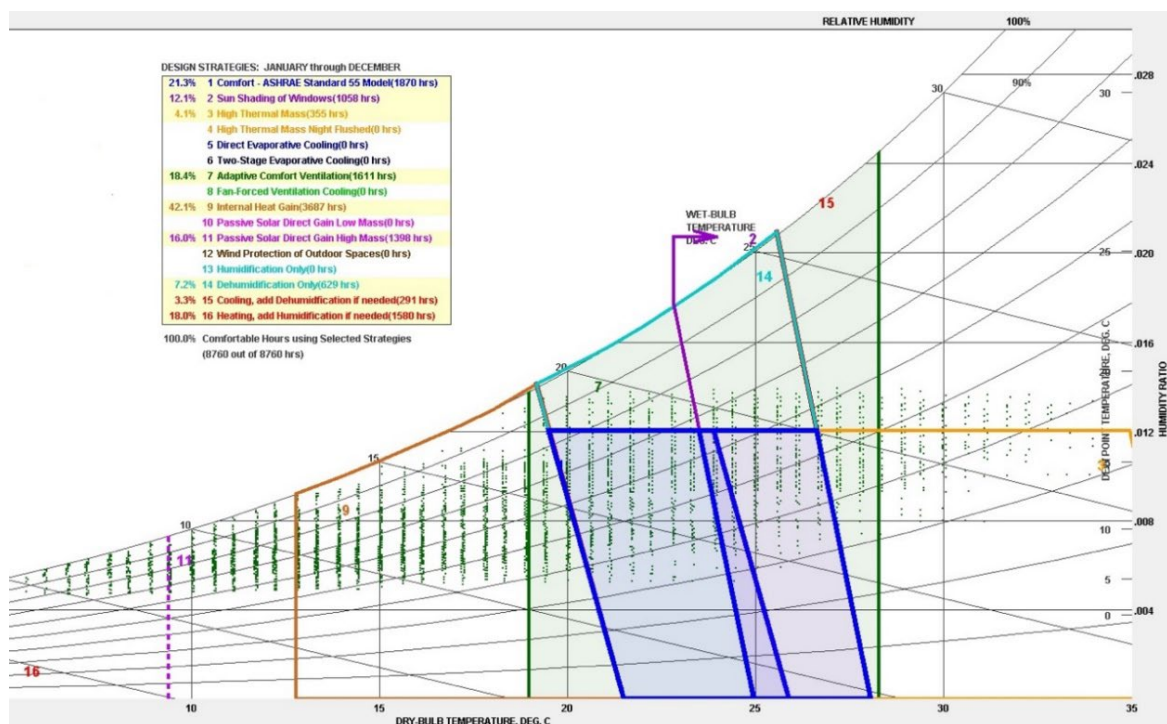


Fig. 1.11. Diagrama Psicrométrico estándar ASHRAE 55-2004. Estudio para una vivienda (Málaga). En el recuadro azul se observa la zona de confort.



Cada una de estas estrategias y su aplicación práctica permiten la elaboración del proyecto preciso en este emplazamiento, controlando su efectividad con modelos virtuales y datos precisos.

Las cuestiones relacionadas con el confort térmico y sus aplicaciones se han abordado desde diferentes puntos de vista: científicos de la construcción (**Khanmirza et al., 2016**), urbanistas (**Burger et al., 2016**), científicos sociales (**Madsen et al., 2017**), antropólogos (**Fu et al., 2016**), ingenieros diseñadores de instalaciones de climatización (**Du et al., 2018**), **Garnier et al., 2015**); incluyendo sistemas para predecir las demandas de calefacción y refrigeración en automóviles (**Pokorny et al., 2014**) entre otras profesiones, y recientemente han atraído la atención de los investigadores del clima en relación con los problemas del cambio climático (**Müller et al., 2015**, **Orosa et al., 2014**).

A través de la historia, las diferentes civilizaciones han tenido en cuenta el confort térmico para diseñar, aislar y controlar las cualidades térmicas y de humedad de un espacio. Aunque no fue hasta el siglo XX cuando se realizaron estudios para proporcionar la base para modelar el confort térmico, donde Povl Ole Fanger hizo un gran avance sentando las bases para modelar teóricamente el confort térmico basado en el desequilibrio entre el flujo de calor real del cuerpo en un ambiente térmico determinado y el flujo de calor requerido para un confort óptimo (es decir, neutral) para una actividad dada.

**Fanger (1967)** ideó una “ecuación de confort” que incluía diferentes parámetros ambientales (tales como nivel de humedad, velocidad del aire, temperatura radiante media y temperatura del aire) de cuyo resultado se interpretaba el grado de confort de las personas en función de la actividad y tipo de ropa. Propuso un índice relacionado llamado Porcentaje estimado de insatisfechos (*PPD*), que se calcula a partir del Voto medio estimado (*PMV*), para medir la calidad de los ambientes interiores y evaluar el nivel de incomodidad del habitante. El método *PMV-PPD*, basado en la teoría de Fanger, se ha aplicado para definir zonas de confort en estándares internacionales como la norma **ISO 7730:2005**, que establece los requisitos para el confort térmico general y el malestar térmico local (**Olesen et al., 2002**) y el **Estándar 55 de ASHRAE** que especifica los rangos de condiciones ambientales interiores para lograr un confort térmico aceptable para los ocupantes del edificio **ANSI/ASHRAE, (2017)**.

La planificación urbana y la arquitectura eficiente son cuestiones muy relevantes en los últimos años debido a la conciencia de las personas sobre el bienestar personal asociado con el confort térmico (**Lindberg et al., 2018**). En espacios al aire libre, la radiación solar es un factor que afecta al confort térmico, siendo en muchas ocasiones la variable más relevante; sin embargo, el método Fanger no tiene en cuenta este componente. Por esta razón, estudios posteriores a la investigación de Fanger han tratado de introducir este hecho, como es el caso de **Brown et al. (1986)**, que propusieron un modelo llamado COMFA en 1986 en el que este factor se vuelve relevante.

Trabajos posteriores también consideran la inclusión del efecto del viento y la actividad en el microclima de la ropa para construir un modelo de confort térmico exterior destinado a sujetos que realizan actividad física (**Kenny et al., 2009**). La aplicación de los modelos Fanger y COMFA generalmente se lleva a cabo mediante un simple programa informático que, ante un conjunto de condiciones determinadas se genera la estimación subjetiva predicha del confort térmico.

Los modelos de confort térmico también se emplean para el estudio de las necesidades de climatización eficiente. **D'Ambrosio et al. (2014)** realizan un estudio sobre los criterios para diseñar sistemas *HVAC* para el confort térmico y el ahorro energético a través de distintos casos prácticos que se proponen para facilitar el trabajo de los ingenieros y poder estandarizar criterios.

En otra investigación, **Ascione et al. (2016)** analizan en un caso de estudio de vivienda de bajo consumo *nZEB* la comparación de diferentes estrategias pasivas mediante una simulación dinámica en *EnergyPlus* y un algoritmo de optimización multiobjetivo con el fin de minimizar la demanda energética y garantizar el confort térmico. Les resulta difícil garantizar un alto nivel de confort térmico cuando se proponen los objetivos *nZEB*. De hecho, **D'Agostino (2015)** afirma que el logro de un concepto común de *nZEB* todavía está lejos de ser implementado en la práctica, especialmente en edificios rehabilitados.

Otros métodos de trabajo más reciente emplean el uso de la inteligencia artificial (IA) para el estudio de los parámetros de confort. Dentro de este campo podemos encontrar las Redes Neuronales Artificiales (RNA) que son sistemas informáticos que se inspiran en el funcionamiento del cerebro de los seres vivos (**Almási et al., 2016, Cao et al., 2018**), y que pueden utilizarse en problemas de agrupamiento y clasificación, aplicándose con éxito en varios campos, incluyendo aplicaciones industriales (**Kusiak et al., 2015, Pulido et al., 2019**), predicción del mercado de valores (**Pilliza et al., 2018**), reconocimiento de patrones, diagnóstico y pronóstico médico, tareas de control, etc.

Los modelos de redes neuronales se han aplicado en los últimos años al problema de la estimación del confort térmico en relación con una implementación eficiente de los sistemas de control de climatización *HVAC* (**Castilla et al., 2013, Ferreira et al., 2012**), de la estimación de los parámetros fisiológicos involucrados en la estimación del confort térmico, tales como la predicción de las temperaturas interna y superficial de la piel (**Michael et al., 2017**) y el modelado de la distribución de la irradiancia espectral solar (**Moreno-Sáez et al., 2014**).

Así, **Ortega-Zamorano et al. (2014)**, implementaron un sistema experto que consiste en un sensor/actuador inteligente que mide cinco variables ambientales y toma una decisión teniendo en cuenta eventos anteriores por medio de una red neuronal artificial. En otro trabajo, **Rodríguez-Alabarce et al. (2016)**, introducen un modelo de neurocomputación para estimar el confort térmico con el fin de definir los principales factores en la ecuación y cómo influye la temperatura en el mismo.

Por otro lado, otros factores que son relevantes para el bienestar en las viviendas y están directamente ligadas a la salud de sus habitantes son los contaminantes naturales de carácter físico, químico y biológico. Estos factores presentes en las viviendas son principalmente los campos electromagnéticos y radioeléctricos, las toxinas y agentes contaminantes químicos, así como hongos, bacterias y otros alérgenos biológicos.

Estos elementos han sido ampliamente estudiados y vienen limitados por las restricciones a las emisiones por radiación o variaciones de campos indicadas por la Norma SBM 2015 (Tabla 1.4) de uno de los centros de investigación más importantes en bioconstrucción y sostenibilidad, la alemana *Institut für Baubiologie+Ökologie Neubeuern* (IBN), que recomienda medidas de protección sanitaria frente a los contaminantes medioambientales de carácter físico, químico y biológico y que contempla el principio de precaución respaldado por diferentes convenios científicos: Convención de Salzburgo del año 2000, el Informe *Bioinitiative* del año 2012 y la Declaración de París del año 2009 (**Baubiologie Maes, 2021**).

La afección de estos factores, aunque han sido motivo de diversos estudios, aún no se considera de forma estandarizada en edificación, debido en parte al rápido avance en los campos de las tecnologías de la información y comunicación, motivo de la obsolescencia constante de las normativas que las rigen y que se deben actualizar periódicamente. Por este motivo, la Normativa Española que regula las condiciones de protección del dominio público radioeléctrico y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas (**RD 1066/2001**), así como la recomendación del Consejo Europeo (**1999/519/CE**) relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos, se consideran obsoletos a estos efectos.

La sensibilidad de muchas personas ante estos campos eléctricos y magnéticos de baja frecuencia presentes en la instalación eléctrica de las viviendas, así como la afección de los campos electromagnéticos de alta frecuencia como son las ondas de telefonía, wifi, radares, presentes en los hogares y sus efectos en la salud de las personas, son motivos de preocupación en la sociedad debido a los escasos estudios existentes en la materia, sobre todo a las radiaciones de nuevas tecnologías que aparecen paulatinamente, como es el caso del 5G.

Los aparatos de medición para medir los valores límites de estas radiaciones son herramientas útiles a tener en cuenta para el conocimiento de la bio-compatibilidad en viviendas.

Entre todos estos peligros para la salud cabe destacar la radioactividad que se libera por la degradación natural de algunos de los elementos que componen suelos y rocas, como el Uranio, el Torio o el Radio, que también se encuentran en la composición de algunos materiales de construcción y que puede filtrarse y almacenarse en los espacios habitables. La legislación española, en la nueva actualización del Código Técnico de la Edificación **CTE DB HS6, (2019)**, incorpora la medición del gas radón como elemento perjudicial para la

salud limitando su presencia procedente del terreno a 300 Bq/m<sup>3</sup> en locales habitables, y establece soluciones constructivas para evitar dichas emisiones.

Ondas electromagnéticas (altas frecuencias)	Natural	Débil	Fuerte	Grave
<i>Densidad de potencia en microwatios por m<sup>2</sup> <math>\mu W/m^2</math></i>	<0,1	0,1-10	10-1000	>1000
<i>Intensidad de campo eléctrico en voltios por metro V/m</i>	<0,006	0,006-0,061	0,061-0,61	>0,61
Campos eléctricos alternos (bajas frecuencias)	Natural	Débil	Fuerte	Grave
<i>Intensidad de campo conectado a tierra en voltios por metro V/m</i>	<1	1-20	20-100	>100
<i>Tensión inducida corporal conectada a tierra en milivoltios mV</i>	<10	10-100	100-1000	>1000
<i>Intensidad de campo de libre potencial en voltios por metro V/m</i>	<0,3	0,3-1,5	1,5-10	>10
Campos magnéticos alternos (bajas frecuencias)	Natural	Débil	Fuerte	Grave
<i>Densidad de flujo en nanoteslas nT</i>	<20	20-100	100-400	>400
Campos magnéticos continuos (magnetostática)	Natural	Débil	Fuerte	Grave
<i>Diferencia de densidad de flujo (acero) en nanoteslas nT</i>	<1000	1000-5000	5000-20000	>20000
<i>Variación de densidad de flujo (corriente) en nanoteslas nT</i>	<1000	1000-2000	2000-10000	>10000
<i>Desviación de la brújula en grados °</i>	<2	2-10	10-100	>100
Radiactividad (radiación gamma, radón)	Natural	Débil	Fuerte	Grave
<i>Aumento de la tasa de dosis en tanto por ciento %</i>	< 50	50-70	75-100	>100
<i>Radón en becquerelios por metro cúbico Bq/m<sup>3</sup></i>	< 30	30-60	60-200	>200
Alteraciones geofísicas (campo magnético y radiación terrestre)	Natural	Débil	Fuerte	Grave
<i>Perturbación de campo magnético terrestre en nanoteslas nT</i>	< 100	100-200	200-1000	>1000
<i>Perturbación de radiación terrestre en tanto por ciento %</i>	<10	10-20	20-50	>50

Tabla 1.4. Valores de referencia para zonas de alta permanencia. Norma SBM-2015.

Todas las variables anteriores, junto a los datos climáticos de estudio, condicionan el bienestar de los usuarios y para ello se precisan conocer todos estos parámetros para un estudio adecuado del confort higrotérmico y bienestar general en los espacios arquitectónicos.

Existen aparatos de medición para obtener cada variable climática, física, química y biológica presente en nuestro alrededor y adquieren especial relevancia estas herramientas y los datos obtenidos a través de ellas que posteriormente serán analizados y considerados en el proceso de diseño. La obtención de estos datos es un requisito necesario para un correcto diseño arquitectónico, pero también se precisan otro tipo de herramientas y aplicaciones informáticas con las que establecer las estrategias en cada proyecto donde se vaya a aplicar Biodomótica.

Por otro lado, los programas de simulación térmica para edificios son extremadamente útiles cuando el rendimiento energético y el confort del edificio es una prioridad. Permiten cuantificar el ahorro energético producido a través de los métodos de diseño introducidos en

el proyecto (**Ruiz et al., 2011**). La calibración de los modelos utilizando datos medidos es fundamental para identificar y estimar el ahorro de energía (**Ascione et al., 2020**). Uno de los programas más utilizados en simulación energética es el *EnergyPlus*, a diferencia de otros programas como SUNREL, DOE-2. BLAST, ESP-r o TRNSYS, cuenta con el motor de cálculo más potente del mercado y permite realizar simulaciones con un amplio repertorio de herramientas para adaptarse a diferentes situaciones. Los criterios de evaluación en el cálculo con *EnergyPlus* incluyen un estudio completo y el análisis del modelo del proyecto permitiendo comparar los datos experimentales con los obtenidos mediante sensores, el confort térmico objetivo, la energía primaria ahorrada y el consumo total de energía.

Estas medidas experimentales se emplean, por ejemplo, para validar el modelo después de una rehabilitación energética de una vivienda y sus resultados se utilizan para evaluar la mejora de la casa con la rehabilitación. Esto puede verse como un método práctico para arquitectos e ingenieros que utilizan la simulación de edificios para evaluar las posibles mejoras de una rehabilitación simplemente usando valores aproximados de los coeficientes de transferencia de calor para todos los cerramientos y ventanas, datos reales del clima, horario de ventilación y ocupación proporcionada por los habitantes de la vivienda.

### 1.5 Medición de variables climáticas

El conocimiento de la temperatura seca (T) y la humedad relativa (HR) en una habitación es importante para evaluar la calidad del aire interior (IAQ) y las condiciones térmicas interiores o el confort en las áreas donde vivimos, trabajamos o estudiamos, con especial atención a los lugares de trabajo como oficinas (**Murthy et al., 2018**), administración de edificios (**Mylonas et al., 2019**), aulas (**Asif et al., 2018, Deng, 2019**), guarderías (**Branco et al., 2015**), granjas (**Hempel, 2018, Wang et al., 2018**) y otros lugares donde se realizan actividades deportivas y se estudia el comportamiento de la vestimenta (**He et al., 2020**).

Estas dos variables pueden influir en muchos fenómenos físicos, químicos, biológicos, mecánicos o electrónicos. Por ello, la medición de la temperatura se realiza de forma continua (**Gasparese, 2013**) y, según la aplicación y la precisión, durante periodos de hasta 60 minutos (**Szczurek et al., 2017**). Así mismo, es de interés en áreas interiores y también exteriores, siendo necesario conocer la dependencia entre ambas medidas (**Asumadu-Sakyi, 2019**). Además, es importante contar con datos de temperatura y humedad relativa en los lugares donde se va a instalar un sistema *HVAC*, para poder diseñarlo y dimensionarlo correctamente y operar de manera óptima con el mayor ahorro energético.

La medición de la concentración de CO<sub>2</sub>, permite estimar la calidad del aire y la ocupación en los lugares (**Jianga et al., 2016**). Su conocimiento puede proporcionar una reducción de costos en sistemas *HVAC* del 37% (**Yang et al., 2012**) y ayuda a determinar estrategias de control en sistemas de ventilación residencial (**Nielsen et al., 2010**) y edificios de gran altura (**Sun et al., 2011**).

Por otro lado, la medición del gas radón es relevante ya que es la segunda causa principal del cáncer de pulmón, causando miles de muertes al año. Cuando se alcanza la vida media del radón, su descendiente se deposita en el tracto respiratorio tras ser inhalado el aire, produciendo una irradiación directa en el tejido a través de las partículas *alfa* (**Aucapiña et al., 2016**). Por lo tanto, puede ser un problema para personas o animales en casas, lugares de trabajo, escuelas o cualquier tipo de edificio. Por tanto, su mitigación se ha convertido en un objetivo fundamental para evitar problemas de salud y evitar que el radón interfiera en las mediciones radiactivas (**Blanco et al., 2017**). Proviene del suelo del sótano donde se ubican los edificios y entra en ellos a través de grietas en los suelos, juntas existentes en la construcción, huecos en suelos suspendidos, cavidades dentro de paredes o suministro de agua. Además, en la naturaleza, el nivel de radón no suele ser elevado, pero en los hogares puede haber altas concentraciones de este gas, por lo que puede llegar al cuerpo humano por inhalación. Debido a esto, puede causar serios problemas de salud si está expuesto a altas concentraciones de este gas durante mucho tiempo. El radón es inodoro, incoloro e insípido, lo cual dificulta su detección (**Lamonaca et al., 2014**).

La integración de los sensores es una solución económica para minimizar el consumo y estudiar los parámetros de confort y calidad del aire. Existen soluciones inalámbricas que se desarrollan utilizando plataformas de hardware de código abierto de bajo costo, como Arduino o Raspberry Pi, aptas para múltiples aplicaciones relacionadas con la monitorización ambiental (**Ferdoush et al., 2014, Ali et al., 2016**) demostrando la utilidad de los sistemas y resolviendo la estructura de la red de sensores inalámbricos desde el software y utilizando métodos de integración de protocolos (**Lian et al., 2013**).

La recogida de datos a largo plazo requiere precisión y robustez del sistema (**Candanedo, 2018**), siendo interesante comparar los resultados obtenidos con un hardware de precisión comercial (**Vidal P. et al., 2018**).

El Internet de las cosas (*IoT*) permite que los esquemas de medición sean monitorizados de forma remota por web o por medio de una aplicación móvil (**López V. et al., 2019**), lo que ayuda a desarrollar sistemas de adquisición de datos muy precisos, autónomos y de bajo costo.

Las plataformas de sensores de mayor interés en la investigación de esta tesis tienen entre otras varias características distintivas con respecto a los aparatos de medición más usuales:

- Hardware de código abierto de bajo coste para *IAQ* y monitorización de confort para prevenir la salud de las personas en espacios interiores y exteriores utilizando un conjunto reducido de sensores.
- Uso de sensores de radón de bajo coste, baja potencia y alta sensibilidad con medidas indirectas a través de la radiación gamma.
- En la medida de lo posible, empleo de baterías para evitar el uso de fuentes eléctricas y minimizar el consumo de energía.



Para la investigación también se han utilizado aparatos de medición comerciales en las fases de estudio y experimentación, así como para obtener los datos necesarios en la fase de simulación, monitorización y calibración de resultados.

Otros aparatos de medición de interés para la investigación de esta tesis son los siguientes medidores de los contaminantes de carácter físico y químico, mostrados en la Fig. 1.12 y 1.13.



Fig. 1.12 Aparatos de medición utilizados a) Medidor de ambiente para medición de temperatura y humedad (Modelo PCE-EM882); b) Solarímetro para medición de niveles de irradiancia (Modelo Kimo SL 100); c) Anemómetro portátil para la obtención de la velocidad del viento (Modelo PCE-AM81); d) Cámara termográfica para detección de fallas en aislamiento y puentes térmicos (Modelo FLIR E50); e) Ventilador de puerta con manómetro digital de precisión para test de estanqueidad de edificios (modelo DG-700); f) Instrumento de medición multifunción para la calibración de los datos de T, HR y CO<sub>2</sub> de sensores de baja sensibilidad (Testo 480).

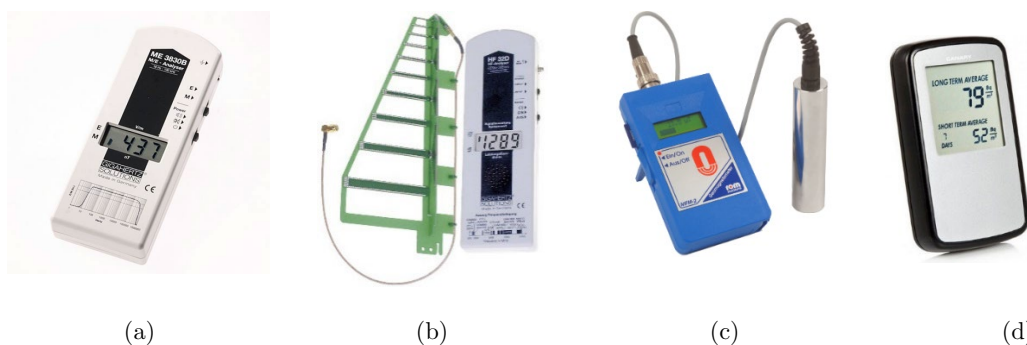


Fig. 1.13 Otros aparatos de medición de contaminantes físicos y químicos: a) Medidores de campos eléctricos y magnéticos alternos de baja frecuencia (Modelo ME 3830B de GIGAHERTZ); b) Medidores de alta frecuencia para medición de campos electromagnéticos (modelo HF32D de GIGAHERTZ); c) Magnetómetros digitales para medir campos magnéticos continuos (Modelo MFM-2 de ROM); d) Medidor de gas radón (Modelo Canary de Corentum).

El uso de dispositivos para monitorizar la energía consumida por cada sistema en un edificio en tiempo real es importante en el análisis de edificios. Esto es posible con una red de detección/control que monitoriza las variables físicas necesarias para un sistema de control inteligente adecuado. En un estudio, **Guerra-Santín et al. (2015)** presentaron una descripción y clasificación general de los métodos de recopilación y adquisición de datos para monitorizar el consumo de energía, el confort térmico de los ocupantes y el funcionamiento de los edificios en uso. Por otro lado, **Han et al. (2020)** proponen un caso de estudio de edificio de oficinas para la integración de un sistema de construcción de ahorro de energía

con una red de detección/control inteligente con niveles satisfactorios de confort térmico y calidad del aire interior.

En el campo de la rehabilitación arquitectónica también adquiere especial importancia el procesado y la calibración de los datos climáticos obtenidos mediante el empleo de herramientas de simulación del comportamiento energético de los edificios a rehabilitar. De especial interés para la investigación de esta tesis es la utilización de *EnergyPlus* como herramienta de simulación energética, que al ser un *software* gratuito y de código abierto, permite a cualquier interesado disponer del motor de cálculo más potente del mercado. Este motor de cálculo permite realizar simulaciones energéticas en distintos niveles de profundidad, ya que posibilita editar una gran cantidad de parámetros para así poder tener una simulación lo más cercana a la realidad posible, si así se desea. Por ejemplo, se puede crear un archivo climático basado en valores climáticos estadísticos e incluir datos reales obtenidos en una localización concreta, para así obtener unos resultados más realistas.

Ejemplo del uso de esta herramienta es un interesante trabajo donde **Blázquez et al. (2015)** comparan la obtención de datos de confort higrotérmico mediante aparatos de medición insitu y la obtención de datos mediante programas de simulación energética en un complejo residencial de los años 50 en Sevilla. Se analizan las desviaciones de los datos reales obtenidos mediante sensores para poder calibrar y optimizar los datos obtenidos mediante *EnergyPlus* para intervenciones de rehabilitación en el clima mediterráneo. Su método de trabajo consiste en la monitorización durante un año de dos espacios de una vivienda tipo para obtener datos de T y HR interiores y exteriores de dos espacios concretos (salón y dormitorio), así como la velocidad del viento exterior.

Para la simulación energética se tienen en consideración también los usos de la vivienda, número de ocupantes y la afección de parámetros como apertura de ventanas y horarios de uso de protecciones solares en las distintas estaciones del año, medidas adoptadas tras entrevistar a los propietarios.

Los resultados verifican que, entre las distintas simulaciones, aquella donde se han considerado parámetros adicionales como sombras arrojadas o la ventilación natural de los espacios se aproxima más a la monitorización real de la vivienda con errores entre 0,5°C y 3°C de diferencia, siendo el parámetro de la ventilación natural el que más afecta a los resultados obtenidos.

## 1.6 Objetivos

La investigación llevada a cabo en esta tesis consiste en el estudio de estrategias en el ámbito de la arquitectura que permita optimizar el consumo energético en los edificios mediante la implementación de sistemas activos y soluciones constructivas pasivas en el proceso edificatorio.



La integración en los edificios de energías renovables, tecnologías de automatización, monitorización y control, es de especial importancia para la consecución de edificios respetuosos con el medio ambiente y es motivo de amplios estudios científicos. En esta tesis se establecen distintas variables para la optimización de la arquitectura bioclimática con las mencionadas tecnologías para la reducción de las demandas energéticas de los edificios, y consecuentemente, sus consumos y emisiones nocivas al medio ambiente; todo ello priorizando, además, la mejora del confort higrotérmico para los usuarios y otros factores que afectan directamente a la salud de las personas como puede ser la calidad de aire interior.

Los principales objetivos de la tesis residen en el estudio y conocimiento de las necesidades de confort de los usuarios en espacios interiores y exteriores a través de experimentos teóricos y empíricos basados en soluciones tecnológicas de inteligencia artificial, la identificación y empleo de aparatos de medición de bajo coste y de fácil manejo que permitan a los proyectistas disponer de las herramientas necesarias para establecer las estrategias del diseño arquitectónico, así como evaluar mediante casos prácticos sobre obra construida la implementación y resultados de estas estrategias.

Existen modelos de predicción del confort de los usuarios contrastados como el método del estándar de Fanger, que permiten una aproximación a estos cálculos, pero en entornos menos controlados como pueden ser los espacios exteriores; estas predicciones reducen su precisión debido a la presencia de variables difíciles de evaluar como pueden ser los agentes meteorológicos (vientos, radiación solar, etc.). Uno de los objetivos de la tesis es la posibilidad de obtener datos fiables de confort en distintos entornos mediante el uso de inteligencia artificial. Para ello, mediante el empleo de redes neuronales con aplicaciones informáticas y modelos matemáticos se realiza un experimento con voluntarios para una aproximación más exhaustiva a estas predicciones que nos permitan conocer el grado de confort de las personas con mayor precisión a la hora de establecer las estrategias del diseño arquitectónico.

Por otro lado, se requieren aparatos de medición para obtener datos climáticos en las fases previas del diseño arquitectónico, así como para monitorizar y controlar los resultados de las estrategias empleadas en los proyectos de edificación. Es un objetivo importante para esta investigación disponer de una solución económica, fiable y de bajo consumo para no depender de aparatos comerciales específicos para cada parámetro a considerar. Por este motivo, en esta investigación se implementa un nodo sensor mediante *software* libre y plataforma Arduino que permite obtener de un modo sencillo los datos que posteriormente se procesarán en la fase de proyecto, así como los datos instantáneos en la monitorización de los edificios en su fase de utilización para un conocimiento continuo del comportamiento de los espacios resultantes.

Otro de los objetivos de esta tesis es la integración de las medidas in-situ de parámetros necesarios para la rehabilitación de viviendas, como pueden ser las medidas termográficas y de infiltraciones, con medidas climáticas precisas de temperatura y humedad interior y

exterior, con simulaciones informáticas térmicas de la vivienda, pudiendo evaluar a priori el efecto de las medidas adoptadas en el confort de los habitantes. Estas medidas generalmente parten de un modelo desconocido que hay que calibrar con medidas reales y, sin embargo, el conocimiento preciso de la configuración arquitectónica de la vivienda permite realizar dichos cálculos con una precisión suficiente sin necesidad de calibración. Este método de trabajo que integra medidas reales, rehabilitación y simulación, es una gran novedad presentada en esta tesis, donde se ha podido evaluar los resultados obtenidos después de una rehabilitación completa de una villa unifamiliar realizada en 2015 por la empresa del autor

Otros objetivos secundarios de interés para la tesis es el análisis de:

- Sistemas de control inteligente que permitan interactuar con los elementos constructivos del edificio (pérgolas, ventanas, lucernarios), las instalaciones (*HVAC*) y los elementos activos como puedan ser la integración de energías renovables, según las necesidades de confort del usuario en cada momento.
- Soluciones constructivas extrapolables para las necesidades de los edificios u obras de ingeniería, basadas en la combinación de sistemas tradicionales constructivos, fenómenos físicos presentes en la naturaleza y aplicaciones tecnológicas de automatización. Entre éstos, elementos presentes en la arquitectura pasiva o bioclimática como puedan ser colectores solares, sistemas constructivos o materiales con alta inercia térmica, aberturas de ventilación, que adopten una funcionalidad autónoma según la estacionalidad o el ambiente exterior gracias al control inteligente preestablecido.
- Materiales eficientes y sostenibles en la construcción de edificios que mejoren la calidad de vida y la salud de sus ocupantes y respeten al mismo tiempo el medio ambiente. El conocimiento de materiales de baja huella ecológica, reciclables y derivados de compuestos naturales son de importancia para esta investigación.
- La renovación de edificios existentes, que en su rehabilitación respondan a criterios de bajo consumo energético en todo el ciclo de vida de la edificación, para una aproximación a los edificios de consumo energético casi nulo (*nZEB*).
- Soluciones de inteligencia artificial, aplicaciones informáticas y tecnologías de la información para automatizar procesos en la obtención de datos (climáticos, de consumos, de hábitos, etc.) y adopción de decisiones y estrategias de diseño arquitectónico (simulaciones informáticas).

### 1.7.- Estructura de la tesis

En el capítulo de Introducción se analiza la problemática de las construcciones existentes, la necesidad de una mayor eficiencia energética a nivel global y una reducción de emisiones en el sector de la edificación. Se hace una revisión de la evolución de la arquitectura y el

estado de arte de las estrategias de diseño para contrarrestar el impacto ambiental causado por la edificación.

Posteriormente, se desarrolla en el capítulo 2 un experimento mediante redes neuronales que permite predecir el confort térmico de las personas de una forma automatizada, aplicado a espacios tanto interiores como exteriores.

En el capítulo 3 se describe el diseño de un sistema de bajo coste para el registro de datos de temperatura seca y operativa, humedad relativa, CO<sub>2</sub>, gas radón y luminosidad mediante baterías basado en la plataforma Arduino.

En el capítulo 4 se presenta el caso de estudio de una rehabilitación energética en una villa aislada ubicada en un clima mediterráneo. Con este objetivo, la solución pasiva llevada a cabo es una renovación de la envolvente aumentando el nivel de aislamiento y sustituyendo las ventanas existentes. Respecto a las soluciones activas, se han implementado dos medidas: la incorporación de tres colectores solares de aire, que introducen aire exterior controlado por termostato y la instalación de dos estufas de pellet que mantienen la temperatura de consigna en temporada de calefacción. Ambos sistemas activos son monitorizados y controlados por un sistema de control inteligente respaldado por una red de sensores de bajo costo. Además, se incluye un estudio energético de la villa antes y después de llevar a cabo la renovación, donde, gracias a la determinación muy aproximada de los parámetros de la vivienda, no es necesaria la calibración del modelo.

En el capítulo 5 se exponen las conclusiones de la tesis y trabajos futuros para concluir con las referencias bibliográficas.



# CAPÍTULO 2

## ESTIMACIÓN EFICIENTE DEL CONFORT TÉRMICO EMPLEANDO UN MODELO DE RED NEURONAL

*Este capítulo ha sido elaborado junto a Francisco Ortega-Zamorano; José M Jerez; José Rodríguez-Alabarce; Leonardo Franco y se encuentra en fase de revisión para su publicación en la revista Soft Computing con el título “Efficient Thermal Comfort Estimation Employing the C-Mantec Constructive Neural Network Model”*

El confort térmico es la condición en la cual una persona siente satisfacción con el ambiente térmico a través de una evaluación subjetiva. En este trabajo, se realiza una estimación compacta y eficiente de la percepción del confort térmico por parte de seres humanos utilizando un modelo constructivo neurocomputacional entrenado con datos generados en condiciones controladas con 49 voluntarios que ofrecen 705 escenarios diferentes. Los resultados se han comparado con dos de los métodos estándar más utilizados para modelar el confort térmico: los modelos Fanger y COMFA, y muestran una mejora en términos de precisión y error cuadrático medio tanto en un escenario de decisión binaria (confort o no) como en un caso discreto de toma de decisiones en el que se consideran diferentes regiones de confort térmico. La flexibilidad del modelo neural permite la incorporación de variables adicionales relacionadas con el sujeto que mejora aún más la precisión de la estimación del confort térmico.

### 2.1 Modelos teóricos del confort térmico

#### 2.1.1 Modelo Fanger

El modelo de confort térmico Fanger es un modelo de equilibrio térmico basado en condiciones fisiológicas y ambientales. El cuerpo humano regula su temperatura para obtener el equilibrio térmico, ya que en ese estado la actividad termorregulada del cuerpo sería mínima. El método representa el voto medio de la sensación térmica en una escala estándar, llamada voto medio estimado ( $PMV$ ) que permite estimar un índice denominado porcentaje estimado de insatisfechos ( $PPD$ ) que se puede determinar para las condiciones ambientales particulares mediante la ecuación:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2)}$$

La Fig. 2.1 muestra la relación entre el *PPD* de un grupo en relación con los valores de *PMV*, que están comprendidos entre -3 y 3. Durante su investigación, Fanger observó dos mecanismos diferentes que son relevantes en el confort térmico: la sudoración y la temperatura media de la piel, que dependen de la actividad física de la persona en la que se determina el confort térmico.

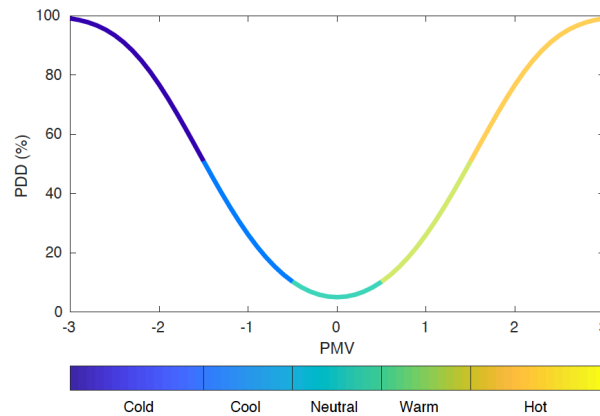


Fig. 2.1. Porcentaje estimado de insatisfechos *PPD* de un grupo en relación con el valor *PMV* en el rango [-3,3].

Existe una relación similar para la temperatura media de la piel, señalando que la temperatura de la piel disminuye a medida que aumenta la actividad física. A partir de estas dos relaciones, Fanger propuso una ecuación de equilibrio térmico a partir de la cual se puede obtener una condición de neutralidad térmica, teniendo en cuenta factores como la tasa metabólica, el aislamiento de la ropa, la temperatura y velocidad del aire, la temperatura radiante media y la humedad relativa. La ecuación de *PMV* descrita por Fanger establece que:

$$PMV = (0.303 \cdot e^{(-0.36 \cdot M_a)} + 0.028) \cdot (M_a - A - B - C - D - E - F),$$

donde  $M_a$  es la tasa metabólica y A, B, C, D, E, F son pérdidas de calor; por difusión a través de la piel, por sudoración, respiración latente, sequedad, por radiación y por convección, respectivamente.

Los valores de *PMV* son ampliamente utilizados para establecer estándares ambientales ergonómicos internacionales en espacios interiores (**ANSI/ASHRAE 55; ISO 7730:2005**) y también se han utilizado para poner a punto sistemas de calefacción y refrigeración autorregulados.

### 2.1.2 Modelo COMFA

Debido a que el modelo Fanger no tiene en cuenta la radiación solar y circundante, este modelo se ha empleado en entornos interiores, lo que genera problemas de precisión cuando se utiliza en entornos exteriores. Para modelar estas tareas, Robert Brown y Terry Gillespie introdujeron una ecuación en 1986 para la estimación del confort térmico conocido como

método COMFA en el que la radiación solar es tomada en cuenta (**Brown y Gillespie, 1986**).

Los modelos COMFA comparan la relación del equilibrio energético entre una persona y el ambiente, introduciendo el coeficiente de equilibrio energético entre el entorno absorbido y la radiación solar que permite su uso en áreas exteriores. De acuerdo con el método COMFA, el balance de energía se puede calcular como:

$$Balance = M + R - E - C - L,$$

donde M es el calor metabólico, R es la radiación solar y circundante absorbida, E es la energía de evaporación, C se refiere a la energía convectiva y L es la radiación emitida. Todas las fuentes de calor se expresan en  $W/m^2$ . El balance de energía se puede relacionar con la sensación de confort térmico utilizando la relación que se muestra en la Tabla 2.1.

Balance (B)	Sensation
$150 < B$	Very Hot
$50 < B < 150 <$	Hot
$-50 < B < 50 <$	Comfort
$-150 < B < -50 <$	Cold
$B < -150 <$	Very Cold

Tabla 2.1. Confort térmico en relación con el balance energético obtenido de la escala COMFA.

El modelo COMFA ha sufrido algunas modificaciones ajustando los parámetros que relacionan los factores con el valor estimado, con el fin de desarrollar varios modelos nuevos a partir del modelo original. En este trabajo hemos empleado el modelo COMFA más realista en ambientes exteriores para comparar con nuestro sistema propuesto y obtener una comparación justa (**Sangkertadi et al., 2014**).

## 2.2 Modelo de redes neuronales artificiales y algoritmo C-Mantec

Los modelos de redes neuronales artificiales son modelos matemáticos inspirados en el funcionamiento del cerebro que pueden usarse para tareas de agrupamiento y clasificación (**Haykin, 1998, Mehrotra et al., 1997, Reed et al., 1998**). En el pasado se han desarrollado varios modelos de redes neuronales, pero en particular para las tareas de clasificación, las arquitecturas más utilizadas son aquellas que utilizan un procesamiento de información de avance. Entre ellos, los perceptrones multicapa, entrenados por el algoritmo de propagación hacia atrás o las arquitecturas de aprendizaje profundo más recientes, son los métodos más populares. Sin embargo, en casi todos los casos, elegir una arquitectura neuronal particular para un problema dado es una tarea compleja y requiere mucho tiempo, por lo que se han propuesto modelos alternativos que construyen automáticamente la

arquitectura (Franco et al., 2010, Gómez et al., 2009, Subirats et al., 2012). *C-Mantec* (Red de mayoría competitiva entrenada por corrección de errores) es un algoritmo de red neuronal constructivo que construye automáticamente arquitecturas compactas de capa oculta única con buenas capacidades de predicción para problemas de clasificación supervisados. *C-Mantec* genera la topología de la red de manera en línea durante la fase de entrenamiento mientras se presentan los patrones de entrada al sistema, evitando el complejo problema de seleccionar una arquitectura neural adecuada. En comparación con los algoritmos constructivos anteriores, la novedad de *C-Mantec* es que las neuronas incluidas en la capa oculta única compiten por aprender los datos entrantes usando una regla de aprendizaje de perceptrones modificada (perceptrón térmico, Frean, 1990), y se ha observado que esto permite la creación de arquitecturas neuronales les muy compactas.

El proceso de clasificación/predicción para una red neuronal o cualquier otro modelo alternativo implica en general al menos dos fases: entrenamiento, donde los parámetros internos del modelo (los pesos sinápticos que conectan las neuronas) se ajustan de acuerdo con los datos del entrenamiento, y fase de prueba, en la que se evalúa el rendimiento del modelo con datos no utilizados previamente en la fase de entrenamiento. *C-Mantec* genera durante la fase de entrenamiento arquitecturas de redes neuronales de alimentación hacia adelante que incluye una capa de entrada de unidades sin procesamiento que solo tienen la función de insertar la información del patrón en el sistema, una sola capa oculta de unidades binarias y una capa de salida con una sola neurona que calcula la función mayoritaria de acuerdo con la activación de las neuronas en la capa anterior. En la fase de prueba, los pesos sinápticos se mantienen fijos y las respuestas de los patrones de prueba emitidas por la red se comparan con su categoría real, analizando esencialmente si la red predice correctamente o no la etiqueta de categoría de los patrones de prueba. En la Fig. 2.6, se muestra una arquitectura creada usando *C-Mantec* para el problema de la estimación del confort térmico. El funcionamiento es el siguiente: el estado de activación binaria ( $S$ ) de las neuronas en la capa oculta depende de las  $N$  señales de entrada que provienen de la capa de entrada  $\psi_i$  y del valor real de los  $N$  pesos sinápticos  $\omega_i$  y sesgo ( $b$ ), que conecta la capa de entrada con las neuronas ocultas:

$$(2.1) \quad S = \begin{cases} 1(ON) & \text{si } h \geq 0 \\ 0(OFF) & \text{cualquier otro} \end{cases},$$

donde  $h$  es el potencial sináptico de una neurona oculta, definida como:

$$(2.2) \quad h = \sum_{i=0}^N \omega_i \psi_i ,$$

En la regla del perceptrón térmico, la modificación de los pesos sinápticos,  $\Delta\omega_i$ , se realiza en línea (después de la presentación de un patrón de entrada único) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$(2.3) \quad \Delta\omega_i = (t - S)\psi_i T_{fac} ,$$



donde  $t$  es el valor objetivo de la entrada presentada, y  $\psi$  representa el valor de la unidad de entrada  $i$  conectada a la salida por peso  $\omega_i$ . La diferencia con la regla de aprendizaje de perceptrón estándar es que el perceptrón térmico incorpora el factor  $T_{fac}$ . Este factor, cuyo valor se calcula como se muestra en la ecuación (2.4), depende del valor del potencial sináptico y de una temperatura introducida artificialmente ( $T$ ),

$$(2.4) \quad T_{fac} = \frac{T}{T_0} e^{\frac{-|h|}{T}},$$

El valor de  $T$  disminuye a medida que avanza el proceso de aprendizaje según la ecuación (2.5), de manera similar a lo que ocurre en el proceso de recocido en los metales.

$$(2.5) \quad T = T_0 \cdot \left(1 - \frac{I}{I_{max}}\right),$$

donde  $I$  es un contador de ciclos que define una iteración del algoritmo en un ciclo de aprendizaje, e  $I_{max}$  es el número máximo de iteraciones permitido. Un ciclo de aprendizaje del algoritmo es el proceso que comienza cuando un patrón elegido al azar se presenta a la red y finaliza después de verificar que la salida de la red es igual al objetivo para este patrón, o cuando una neurona elegida (la neurona con mayor valor  $T_{fac}$  o una nueva neurona añadida) modifica sus pesos sinápticos para conocer el patrón presentado real.

El algoritmo *C-Mantec* tiene tres parámetros que se deben configurar al iniciar el procedimiento de aprendizaje, y varios experimentos han demostrado la robustez del mismo, que funciona bastante bien en una amplia gama de valores parámetros. El algoritmo tiene los siguientes tres parámetros:

- $I_{max}$ : número máximo de iteraciones de aprendizaje permitidas para cada neurona en un ciclo de aprendizaje.
- $g_{fac}$ : factor de crecimiento que determina cuando detener un ciclo de aprendizaje e incluir una nueva neurona en la capa oculta.
- $\phi$ : determina en qué caso un ejemplo de entrada se considera ruido y se elimina del conjunto de datos de entrenamiento de acuerdo con la siguiente condición:

$$(2.6) \quad borrar(x_i) \mid N_{LT} \geq (\mu + \phi\sigma),$$

donde  $x_i$  representa un patrón de entrada,  $N$  es el número total de patrones en el conjunto de datos,  $N_{LT}$  es el número de veces que el patrón  $x_i$  se ha presentado a la red en el ciclo de aprendizaje actual, y donde  $\mu$  y  $\sigma$  se corresponden con la media y la varianza de la distribución para todos los patrones en la cantidad de veces que el algoritmo ha intentado aprender cada patrón en un ciclo de aprendizaje. El procedimiento de aprendizaje comienza con una neurona presente en la única capa oculta de la arquitectura y una neurona de salida calcula la función mayoritaria de las respuestas de las neuronas ocultas (esquema de votación). El proceso continúa presentando un patrón de entrada a la red y, si se clasifica erróneamente, este será aprendido por una de las neuronas presentes cuya salida no coincide

con el valor del patrón objetivo si se cumplen ciertas condiciones, de lo contrario, se incluirá una nueva neurona en la arquitectura para aprenderlo. Entre todas las neuronas que clasificaron erróneamente el patrón de entrada, la que tenga el  $T_{fac}$  mayor lo aprenderá, pero solo si este valor de  $T_{fac}$  es mayor que el parámetro  $g_{fac}$  del algoritmo. Si no se encuentra ningún perceptrón térmico que cumpla estos criterios, se agrega una nueva neurona a la red, comenzando un nuevo ciclo de aprendizaje que incluye el restablecimiento de la temperatura de todas las neuronas a  $T_o$ . También al final de un ciclo se aplica el procedimiento de filtrado de patrones ruidosos (Ecuación 2.6). El algoritmo continúa su operación repitiendo iterativamente las etapas anteriores hasta que la red clasifique correctamente todos los patrones del conjunto de entrenamiento. Durante el proceso de aprendizaje, se evita el olvido catastrófico ya que los pesos sinápticos solo se modifican si el cambio involucrado es pequeño (controlado por el valor de  $g_{fac}$  y por un proceso similar al recocido de metales que reduce la temperatura a medida que avanza el aprendizaje), como si este no fuera el caso, el algoritmo introduce una nueva neurona en la arquitectura (Subirats et al., 2012).

### 2.3 Estudio experimental con voluntarios

Para entrenar y probar los diferentes modelos de confort térmico se requieren un conjunto de datos y, por lo tanto, se han llevado a cabo una serie de experimentos con personas. Para hacer esto y con el objetivo de probar diferentes escenarios, se preparó un espacio en el que los investigadores configuran las variables ambientales utilizando varios dispositivos (lámpara, ventilador, aire acondicionado y humidificador) que se describen a continuación.

#### 2.3.1 Elementos de control de variables ambientales

La Fig. 2.2 (a) muestra la lámpara CSI-OQ-1000 Thorn utilizada para simular diferentes niveles de irradiación y diferentes elevaciones y azimut solar. La Fig. 2.2 (b) muestra los ventiladores industriales, mf-30p, utilizados para generar condiciones de viento con diferentes niveles de velocidad. La Fig. 2 (c) muestra el equipo de aire acondicionado Haier Brezza-12K instalado en el espacio para enfriar o calentar según el escenario a analizar. La Fig. 2.2 (d) muestra el humidificador Beurer LB-88 empleado en la regulación de la humedad relativa del aire (la Tabla 2.2 muestra las características principales de los dispositivos utilizados).

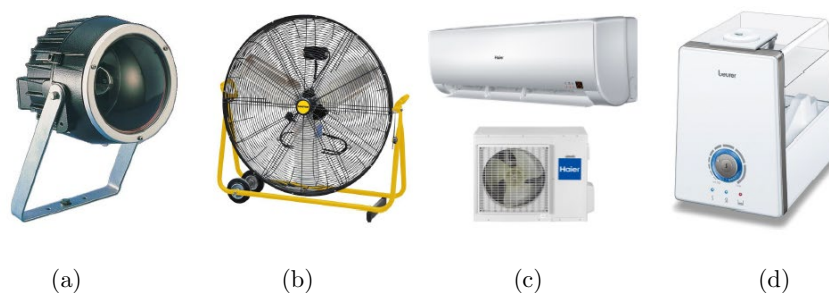


Fig. 2.2: Dispositivos utilizados para controlar las variables ambientales, (a) CSI-OQ-1000 Thorn lamp (radiación), (b) Ventilador industrial mf-30p (viento), (c) Haier Brezza-12K Sistema aire acondicionado (temperatura y humedad), y (d) humidificador Beurer LB-88 (humedad).

Characteristic	Value	Characteristic	Value
Dimension	(380 x 262 x 350) mm	Dimension	(990 x 940 x 300) mm
Consumption	1 kW	Consumption	378 W
Power	1 kW	Max. airflow	19.200 m <sup>3</sup> /h
Luminous Flux	21500 Lm	Diameter	750 mm
Color Temp.	2900 K	Rotation	360°

(a) (b)

Characteristic	Value	Characteristic	Value
Dimension	(855 x 204 x 280) mm	Dimension	(295 x 195 x 280) mm
Consumption	1350 W	Consumption	16-280 W
Cooling	3600 W	Capacity	550 ml/h
Heating	3700 W	Deposit	6 l
Max. airflow	660 m <sup>3</sup> /h		

(c) (d)

Tabla 2.2: Características de los elementos utilizados para controlar las variables ambientales, (a) dispositivo de control de niveles de irradiancia, (b) dispositivo de control de la condición de viento, (c) dispositivo de control de sensación de temperatura y (d) dispositivo de control de la condición de humedad.

### 2.3.2 Medición de elementos de variables ambientales

Se han utilizado varios dispositivos para medir las variables involucradas en el estudio del confort térmico. La Fig. 2.3 (a) muestra el medidor de entorno PCE-EM882 para medir la temperatura y la humedad. Este dispositivo también puede medir la luz y el nivel de sonido, pero estas funciones no se utilizaron en este experimento. La Fig. 2.3 (b) muestra el Solarímetro portátil Kimo SL 100 utilizado para medir el flujo radiante solar recibido por unidad de área. La Fig. 2.3 (c) muestra el anemómetro portátil PCE-AM81 utilizado para medir la velocidad del viento. Las características principales de estos dispositivos utilizados se muestran en la Tabla 2.3.



Fig. 2.3. Dispositivos utilizados para medir las variables involucradas en el estudio: (a) medidor de ambiente PCE-EM882 (temperatura), (b) Solarímetro Kimo SL 100 (nivel de irradiancia), (c) PCE-AM81 anemómetro portátil (velocidad del viento).

Characteristic	Value	Characteristic	Value
Dimension	(50 x 120 x 33) mm	Dimension	(156 x 60 x 33) mm
Weight	150g	Weight	160g
Working temp.	-10°C +50°C	Range of measurement	0.4...30.0 m/s
Range of measurement	1-1300 W/m <sup>2</sup>	Resolution	0.1 m/s
Frequency of calculation	2/s	Accuracy	±3%(<20 m/s) ±4%(>20 m/s)
Accuracy	5% mm		

(a) (b)

Characteristic	Value	Characteristic	Value
			Humid.
			Temp.
Dimension	(251 x 64 x 40)mm	Range of measurement	25-95% H.r
		Resolution	0.1%
Weight	250g	Accuracy	±5%
			±3,5%

(c)

Tabla 2.3: Características de los dispositivos utilizados para medir la radiación solar (a), velocidad del viento (b) y temperatura y humedad (c).

### 2.3.3 Grupo de estudio

Se realizaron varias pruebas con la participación de 49 voluntarios de diferentes edades y constituciones corporales en diferentes condiciones ambientales controladas. Cada persona ha estado expuesta a 15 experimentos bajo variaciones de radiación solar, humedad, temperatura, viento, vestimenta y actividad en los que los valores han sido monitorizados con precisión utilizando el equipamiento descrito anteriormente. La Tabla 2.4 muestra el rango de valores de las variables utilizadas en los experimentos. El índice de masa corporal (IMC) se midió para todos los sujetos, ya que puede influir en la sensación térmica. La presión arterial (PA) también se midió durante los experimentos mediante el monitor portátil “Beurer Medical BC32”, pero no se usó para predecir el confort térmico. En los experimentos, los sujetos tienen que indicar después de un mínimo de 120 segundos su sensación de confort en el rango de valores continuos de acuerdo con la escala ASHRAE.

Se ha aplicado un análisis de componentes principales (*PCA*) a los datos obtenidos de los experimentos. *PCA* es un procedimiento estadístico que utiliza una transformación ortogonal lineal para convertir un conjunto de observaciones de variables posiblemente correlacionadas

en un conjunto de variables no correlacionadas llamadas componentes principales. El conjunto completo de componentes principales es tan grande como el conjunto original de variables, pero es común que la suma de las variaciones de los primeros (dos o tres) componentes principales exceda el 80% de la varianza total de los datos originales.

La Fig. 2.4 muestra el porcentaje de varianza explicado por cada componente principal (barra vertical) y el valor acumulado de los componentes anteriores (línea continua). Los primeros dos componentes explican aproximadamente el 60% de la varianza total, mientras que el uso de los tres primeros componentes lleva este nivel hasta aproximadamente el 80%. Debido a que los gráficos tridimensionales no se muestran bien en el documento de soporte en papel, decidimos realizar un análisis de los datos de los sujetos con solo los 2 primeros componentes. La Fig. 2.5 muestra las nueve variables experimentales (datos de sujeto y condiciones ambientales), representadas en este gráfico por un vector, cuya dirección y longitud indican cómo cada variable contribuye a los dos componentes principales. El primer componente principal, en el eje horizontal, tiene coeficientes positivos para la mayoría de las variables, en particular para todas ellas, excepto el IMC y la ropa, siendo los coeficientes más grandes los correspondientes a la humedad y temperatura. Sin embargo, el segundo componente principal, en el eje vertical, tiene coeficientes positivos para todas las variables, excepto para la variable sexo. La variable actividad, que apenas se puede ver en el gráfico, no aporta casi nada a los dos componentes principales, y esto se debe al hecho de que su contribución está relacionada con el tercer componente (no mostrado) que representa aproximadamente el 20% de la varianza total. Los puntos rojos en la figura representan las 705 observaciones registradas en los experimentos en función de los dos componentes principales.

	Variable	Range/Categories
Standard	Radiation	{15,250,550,850} W/m <sup>2</sup>
	Humidity	[33 - 45] %
	Temperature	[18 - 32] °C
	Wind	[0 - 4] m/s
	Clothing	[Winter, Spring, Summer]
	Activity	[None, office, type]
New	Age	[22 - 50] Years
	Sex	{ <i>Male, Female</i> }
	BMI	[19 - 34] Kg/m <sup>2</sup>

Tabla 2.4: Conjunto de variables estándar y nuevas y su rango (o categoría) utilizado para la estimación de la sensación de confort térmico en los diferentes experimentos.

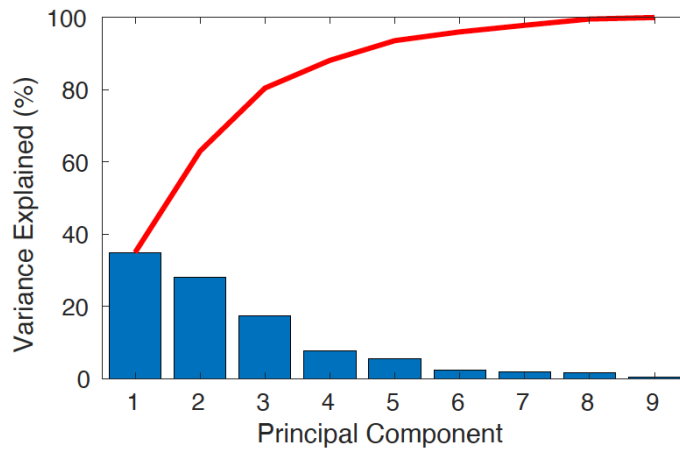


Fig. 2.4: Porcentaje de varianza explicado por cada uno de los componentes principales (barras verticales) y el valor acumulado (línea continua).

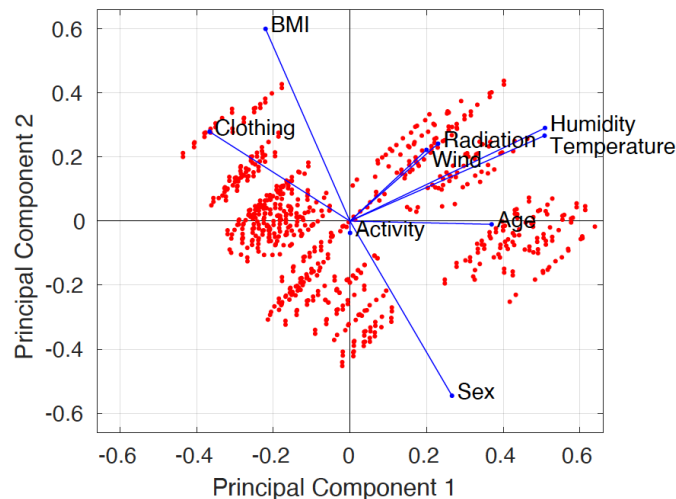


Fig. 2.5: Representación *PCA* de los datos. Las ocho variables (líneas continuas) y los datos grabados del sujeto (puntos rojos) se representan en el espacio bidimensional del primer y segundo componente principal.

## 2.4 Resultados

Uno de los objetivos principales de este trabajo es probar la precisión de predicción de un modelo constructivo de redes neuronales (*C-Mantec*) con respecto a la sensación de confort térmico que sienten los sujetos en diferentes condiciones ambientales, y compararlo con los que se pueden obtener de los modelos Fanger y COMFA.

En un primer análisis, probamos la precisión de los modelos para predecir correctamente si un sujeto determinado bajo condiciones ambientales definidas se siente cómodo o no (es decir, una tarea de predicción binaria). Como la salida del conjunto de datos registrado (*PMV*) es continua y el modelo propuesto es binario, el conjunto de datos se ha discretizado, seleccionando dos salidas posibles diferentes, comodidad ( $-0.5 < PMV < 0.5$ ) o no comodidad (resto de valores) (en relación con la Fig. 2.1, la comodidad corresponde a la zona neutra

indicada, y no la comodidad a la región exterior). Todo el conjunto de datos se dividió en conjuntos de datos de entrenamiento y prueba, utilizando el 60% y el 40% del total de casos. El algoritmo de red neuronal *C-Mantec* se ejecutó con la siguiente configuración estándar para los parámetros:  $g_{fac} = 0.05$ ,  $l_{max} = 1000$ ,  $\phi = 2$  y se consideraron dos modelos: uno con las seis variables de entrada estándar utilizadas por los modelos teóricos (Fanger y COMFA) denotados como modelo “6 Var”, y un segundo que también incluye como variables de entrada la edad, el sexo y el índice de masa corporal indicado como modelo “9 Var”.

Los primeros resultados se muestran en la Tabla 2.5 donde la primera columna indica el método utilizado; la segunda columna muestra la precisión obtenida para la cual se indican el valor medio más la desviación estándar (también se muestran los valores máximo y mínimo). La última columna indica el número de neuronas que el modelo *C-Mantec* elige automáticamente, y esta columna también contiene tres subcolumnas con media más desviación estándar, valores máximos y mínimos. Se realizaron 100 ejecuciones al azar para el esquema de división de datos indicado para cada modelo.

Method	Accuracy			# of neurons		
	Mean $\pm$ Std	Max	Min	Mean $\pm$ Std	Max	Min
Fanger	0.5287 $\pm$ 0.0226	0.5816	0.4645	-	-	-
COMFA	0.5698 $\pm$ 0.0235	0.6277	0.5248	-	-	-
ANN (6 Var.)	0.8335 $\pm$ 0.0208	0.8723	0.7801	10.89 $\pm$ 1.1538	14	9
ANN (9 Var.)	0.8438 $\pm$ 0.0212	0.9113	0.7872	6.17 $\pm$ 0.4935	7	5

Tabla 2.5: Valores de precisión para la predicción de la sensación de *comfort - no comfort* según los métodos teóricos (Fanger y COMFA) y el método propuesto de neurocomputación *C-Mantec*. El rendimiento de *C-Mantec* se analizó utilizando como entradas las seis variables habituales (6 Var.) y un conjunto extendido de variables (9 Var.) (ver el texto para más detalles).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} -5.36 & -82.60 & -106.74 & 19.51 & -24.04 & -25.39 & -10.70 & 54.16 & 63.26 & -95.61 \\ -12.11 & -4.95 & -102.50 & 30.44 & 14.18 & 16.59 & 0.32 & -45.36 & -8.57 & -72.64 \\ -37.75 & 5.66 & 40.18 & 40.85 & -38.69 & 1.46 & 12.34 & -56.11 & -21.56 & -41.63 \\ -23.93 & -3.73 & -45.19 & 1.98 & -4.33 & -44.83 & -5.53 & -9.30 & 4.94 & -86.32 \\ -17.06 & -13.52 & 11.42 & -23.47 & 5.53 & 29.82 & -9.06 & 9.73 & 8.78 & -4.86 \end{bmatrix}}_M \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \end{bmatrix}$$

(2.7)

$$\text{Comfort} = [(Y_1 \geq 0) + (Y_2 \geq 0) + (Y_3 \geq 0) + (Y_4 \geq 0) + (Y_5 \geq 0)] \geq 5/2$$

(2.8)

Una de las principales ventajas de usar el modelo de red neuronal propuesto es que, como generalmente genera arquitecturas con un bajo número de neuronas, se puede extraer una ecuación lógica relativamente simple, que en el presente caso corresponde a la ecuación de confort. Las ecuaciones (2.7) y (2.8) muestran la función lógica para el caso de confort / no confort en el que se ha elegido un modelo con solo 5 neuronas en la capa oculta para simplificar el modelo tanto como sea posible (este modelo alcanza una probabilidad de éxito de 89.57%). La Fig. 2.6 muestra dicha red que comprende las 9 neuronas de entrada (más el término de sesgo), la matriz de pesos sinápticos  $M$  (aprendida durante el entrenamiento), las 5 neuronas de capa oculta ( $Y_i$ ) y la salida binaria única. La ecuación (2.8) representa matemáticamente la operación final de la arquitectura mostrada, con  $Y_i$  con  $i = 1, \dots, 5$  valores que representan el resultado de la Ecuación (2.7), obtenida a través de una multiplicación entre una matriz de pesos sinápticos ( $M$ ) de la arquitectura neural y un vector de entradas ( $X_1, X_2, \dots, X_9$ ) (el término -1 en el último componente del vector corresponde a un término de sesgo fijo). Las nueve entradas  $X_i$  representan las variables ambientales y de sujeto que son la radiación solar, humedad, temperatura, viento, vestimenta, actividad, sexo, IMC y edad, respectivamente. Por lo tanto, al multiplicar la matriz de pesos sinápticos aprendidos por las variables ambientales y de sujeto, se puede obtener la respuesta de 5 neuronas intermedias, y a partir de ellas se puede calcular la condición de Confort / No Confort utilizando la Ecuación (2.8). Esta ecuación, que representa la operación de salida de la red neuronal, calcula la función mayoritaria de la activación de las neuronas de la capa oculta ( $Y_i$ ), de modo que si se satisfacen tres o más de los cinco factores de la ecuación ( $Y_i \leq 0$ ), entonces la variable de salida Confort es Verdadero (y Falso en cualquier otro caso, es decir, dos o menos números de factores verdaderos).

En otros análisis destinados a comprender el modelo obtenido, calculamos la probabilidad de una decisión correcta cuando se consideran los dos primeros componentes principales de las entradas (véase la Fig.2.5 y el texto relacionado con el *PCA*). La Fig. 2.7 muestra esta probabilidad de decisión correcta del sistema de red neuronal diseñado, generado del análisis de los dos primeros componentes principales a partir de los datos sin procesar: primero, se ha obtenido el componente principal para cada patrón de entrada del conjunto de datos, para luego normalizar el espacio de los dos componentes principales entre -1 y 1. A partir de estos valores, se calcula la probabilidad de una decisión correcta para todo el conjunto de datos, mientras que los valores vacíos se calculan mediante una interpolación lineal del resto de valores. Es posible identificar en el gráfico tres áreas donde la precisión de la predicción es menor que el promedio (aproximadamente en el rango de 0.6). Un análisis de los datos que corresponde a estos tres casos muestra que: las dos áreas con valores alrededor de (-0.5, 0.9) y (0.5, 0.9) corresponden a situaciones límite entre la sensación de confort térmico cálido/caliente con altos niveles de radiación y para el caso de ambos sexos. La región alrededor del punto (0, -0.9) corresponde a una región límite entre la sensación de confort frío/fresco para el caso de no radiación.



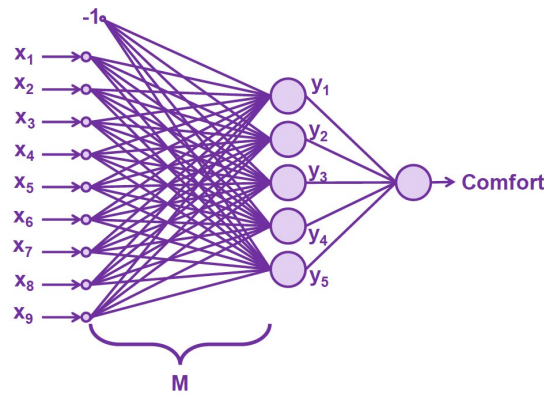


Fig. 2.6: Arquitectura de red neuronal generada por el algoritmo *C-Mantec* para estimar en función de las 9 variables de entrada si un sujeto humano se encuentra en una situación de confort o no.

En el análisis anterior consideramos solo la situación de Confort / No Confort, por lo que decidimos ampliar el estudio de la predicción del modelo para el caso de una sensación térmica graduada, utilizando un rango discreto de 5 categorías de respuesta posibles: frío, fresco, neutro, cálido y calor (ver Fig. 2.1) para el rango de valores de *PMV* y sus valores *PDD* correspondientes).

La Tabla 2.6 muestra la precisión y el error cuadrático medio realizado en el análisis de confort térmico de acuerdo con los 5 posibles estados de salida para el modelo de red neuronal propuesto y para los métodos tradicionales Fanger y COMFA. Los valores de predicción obtenidos son para los cuatro casos peores que los obtenidos previamente para el caso binario, y la razón de esto es que predecir correctamente la salida en 5 categorías es una tarea más difícil. Se puede ver que también en este caso la red neuronal supera a los otros dos modelos tradicionales. La primera columna en la Tabla 2.6 muestra el método utilizado; la segunda y tercera columna muestran la precisión y el *MSE* (del inglés *Mean Square Error*) respectivamente, mientras que la última columna indica el número de neuronas que necesita el modelo de red neuronal para llevar a cabo la predicción.

Se realizó un análisis adicional para estudiar cómo se distribuyen los errores para cada categoría y para cada uno de los tres métodos aplicados, y los resultados se muestran en la Fig. 2.8. En cada cuadro, la marca central indica la mediana, y la parte inferior y los bordes superiores de la caja indican los percentiles 25 y 75, respectivamente. Los márgenes se extienden a los puntos de datos más extremos que no se consideran valores atípicos, y los valores atípicos se trazan individualmente con el símbolo “+”.

## 2.5 Conclusiones

Se introdujo un nuevo estudio basado en el uso de un modelo constructivo de redes neuronales para la estimación del confort térmico y se aplicó a nuevos datos registrados de varios sujetos humanos en diferentes condiciones ambientales. El método de la Red Neural Constructiva empleado genera pequeñas arquitecturas que permiten analizar aún más los

resultados y también permite su implementación en dispositivos de hardware de bajo costo que podrían incorporarse en sistemas de climatización para su regulación automática.

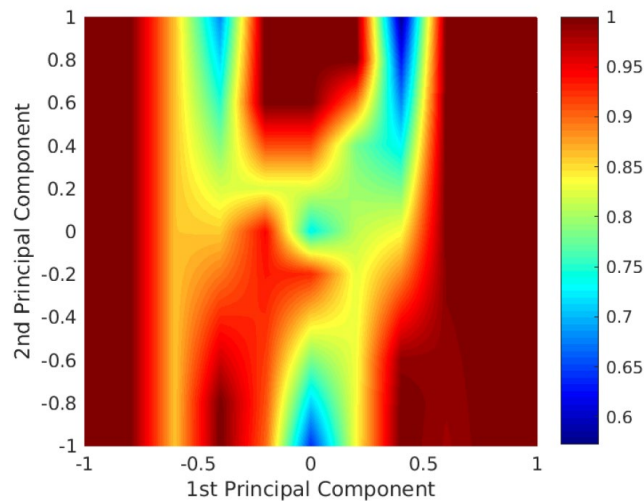


Fig. 2.7: Probabilidad de decisión correcta del sistema de red neuronal diseñado de acuerdo con los dos primeros componentes principales de los patrones de entrada.

Method	Accuracy			MSE			# of neurons		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
Fanger	0.420±0.022	0.479	0.369	1.366±0.123	1.675	1.075	-	-	-
COMFA	0.244±0.017	0.284	0.202	9.934±0.517	10.993	8.621	-	-	-
ANN (6 Var.)	0.517±0.037	0.624	0.422	1.123±0.248	1.394	0.892	52.2±2.49	54	48
ANN (9 Var.)	0.585±0.048	0.678	0.453	0.805±0.171	1.552	0.526	33.66±1.38	38	30

Tabla 2.6: Valores de precisión para la predicción de la sensación de confort percibida en 5 categorías según Fanger, modelos COMFA y *C-Mantec*. El rendimiento de *C-Mantec* se analizó utilizando como entradas las seis variables habituales (6 Var.) y un conjunto extendido de variables (9 var.) (ver texto para más detalles).

En una primera tarea de predicción binaria de *Confort / No confort*, el modelo de red neuronal funcionó bastante bien con valores promedios superiores a 0.83, superando los resultados de los modelos Fanger y COMFA. Cuando la tarea de predicción se extendió a 5 categorías (frío, fresco, neutro, cálido y calor), la precisión se redujo mucho, pero el modelo introducido fue bastante superior a los estándares.

Para la estimación del confort térmico en 5 categorías, la precisión del modelo propuesto es significativamente peor, con valores máximos de 0.624. Sin embargo, la estimación continúa siendo significativamente más alta que para los modelos Fanger y COMFA, señalando que en este caso el modelo COMFA funcionó mucho peor que el modelo Fanger. Un análisis realizado sobre la distribución de MSE muestra que el modelo Fanger conduce a valores de

error muy altos para la *categoría calor* y esto indica que la estimación de irradiancia no se realiza con precisión. El análisis para los modelos Fanger y ANN también muestra un sesgo con errores mayores que el promedio, pero en este caso para la *categoría FRÍO*, señalando que la diferencia es mucho mayor para el caso del modelo Fanger. El modelo de Fanger no tiene en cuenta las condiciones de radiación, y esto podría explicar parte del sesgo, pero el hecho de que también el modelo neural tenga un error mayor en esta categoría indica una mayor variabilidad en la percepción de los sujetos para la *categoría frío*, lo que sugiere que otros factores ambientales pueden ser necesarios para mejorar su estimación.

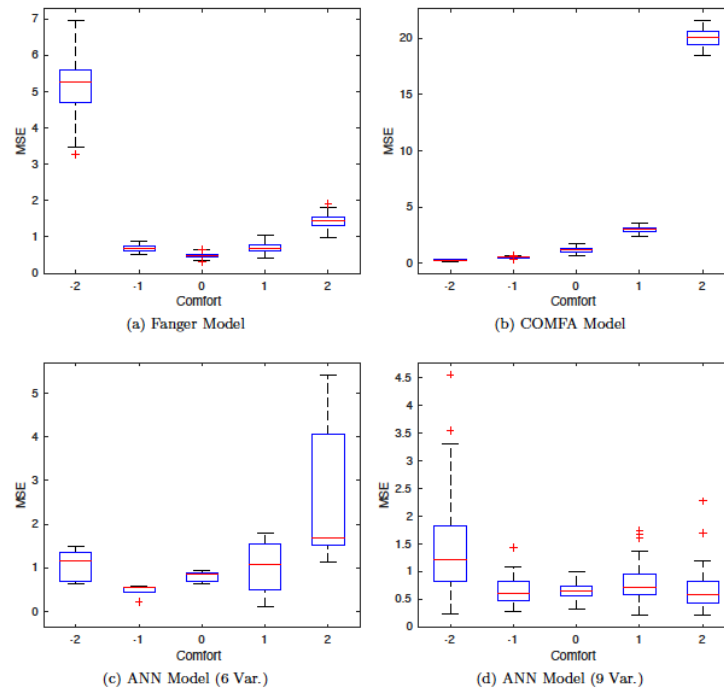


Fig. 2.8: Distribución de  $MSE$  para los cuatro modelos utilizados para el caso de predicción del confort térmico en 5 categorías (frío, fresco, neutro, cálido y calor). Nota: la escala del eje Y es diferente en cada caso (consultar texto para obtener más detalles).

Los modelos de redes neuronales se entrenaron con 6 variables de entorno estándar y también se agregaron otras 3 variables relacionadas con el sujeto (edad, sexo e IMC). La adición de estas tres variables conduce a una mejora de 1.23% y 13.15% en los casos de predicción binaria y de 5 categorías respectivamente, también observando el hecho de que el modelo de 9 variables de entrada necesitaba un menor número de neuronas en ambos casos, indicando que esta información adicional reduce la complejidad de la tarea.

La conclusión general del presente trabajo es que los modelos basados en redes neuronales parecen adecuados para la estimación de la percepción del confort térmico, lo que lleva a valores de predicción más precisos que los modelos estándar Fanger y COMFA. Sin embargo, los bajos valores de precisión de predicción (en el rango de 0.5 - 0.6) para el caso de las 5 categorías podrían indicar que se deben tener en cuenta otras condiciones del sujeto o ambientales para aumentar estos niveles, y en este sentido está claro que la radiación es un factor clave a tener en cuenta en futuros análisis.



# CAPÍTULO 3

## SENSOR REMOTO DE BAJO COSTE PARA APLICACIONES DE MEDIDA DE TEMPERATURA OPERATIVA, HUMEDAD RELATIVA, CO<sub>2</sub>, RADÓN Y LUMINOSIDAD.

*Este capítulo se ha elaborado con la ayuda de D. Trujillo-Aguilera, R. Vázquez-Martin, A. Fernández-Gutiérrez y C. Trujillo-Luque y se propone para enviar a la revista Sensors.*

El conocimiento de la temperatura seca y de la humedad relativa en cualquier espacio es muy importante para evaluar la calidad del aire y el confort, pero es de interés especial en espacios interiores, conocer la dependencia con la temperatura operativa y el nivel de CO<sub>2</sub>, permitiendo diseñar sistemas de *HVAC* de forma óptima con el máximo ahorro energético. Además, la medición del gas radón es necesaria para evitar problemas de salud en las personas o animales en estos espacios cerrados y conocer la luminosidad interior conlleva a mejorar el confort visual de las personas. Por todo ello, se ha desarrollado un dispositivo con múltiples sensores que miden estas variables de forma precisa, rápida y con un mínimo coste. La integración de los sensores es una solución económica para minimizar el consumo y estudiar los parámetros de confort y calidad del aire, mediante un sistema inalámbrico que utiliza plataforma hardware de código abierto tipo Arduino, utilizando baterías de larga duración para los datos de temperatura y humedad relativa, baterías de alta capacidad para la medición de CO<sub>2</sub> y alimentación y/o autoconsumo para la medición del radón y luminosidad.

### 3.1 Estado de la cuestión

La humedad relativa (HR), temperatura (T) y concentración de CO<sub>2</sub> son parámetros que se utilizan para múltiples tareas, entre las que se encuentra la calidad del aire interior. Existen muchas investigaciones que examinan sistemas inteligentes que utilizan plataformas Arduino aplicadas a espacios interiores (Sarhan, 2020), así como estudios que desarrollan y demuestran el rendimiento de un sistema de sensores interiores portátil de bajo coste (Adiono et al., 2018).

El avance tecnológico ayuda a facilitar la realización de tareas de medición complejas, monitorizando todos los parámetros en tiempo real mediante sensores inalámbricos que permiten el mejor equilibrio entre el confort y consumo energético (Miqdad et al., 2017).

La calidad del aire afecta a la salud puesto que un alto nivel de CO<sub>2</sub> puede causar enfermedades graves. Por esta razón se han desarrollado múltiples sistemas que controlan la concentración del gas y muestran el valor en pantallas fáciles de leer (**Lapshina et al., 2019**). La expansión del IoT hace que los sistemas de medición sean inteligentes y capaces de monitorizar muchos parámetros, con el fin de controlar tanto el sistema *HVAC* como el consumo de energía, desarrollando sensores especiales para este caso (**Molnár et al., 2019**).

En la Unión Europea (UE) la Directiva del Consejo Euratom (**Directiva 2013/59/EURATOM**) establece normas de seguridad para protegernos de los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes en viviendas y recientemente el Código Técnico de la Edificación español ha incluido un documento básico sanitario para limitar el riesgo de exposición de usuarios a concentraciones inadecuadas de radón del suelo dentro de locales habitables en general. El radón es uno de los gases más peligrosos que pueden introducirse en los espacios habitables, siendo la segunda causa de cáncer de pulmón en el mundo, después del tabaco. Es considerado carcinógeno por la OMS (Organización Mundial de la Salud) (**WHO, 2015**) y está clasificado como grupo 1 por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (*EPA*) (**I. E. D. 6609, 2012**). Los estudios realizados por el Consejo de Seguridad Nacional (*CSN*) han permitido elaborar varios mapas que establecen los niveles de concentración de radón en España (**CTE DB HS6, 2019**).

El gas radón es radiactivo y de origen natural, procedente de la desintegración del uranio (<sup>238</sup>U) en el suelo, cuyo principal medio de propagación es la convección y difusión en el aire. La desintegración del <sup>238</sup>U genera Radio (<sup>226</sup>Ra) y luego la desintegración del Radio genera radón. En la naturaleza existen tres isótopos, el más conocido de los cuales es el radón (<sup>222</sup>Rn), con una vida media de 3.8 días, sus descendientes de vida corta alteran el ADN (ácido desoxirribonucleico) de los tejidos pulmonares. El radón en el aire libre tiene concentraciones bajas, mientras que en los hogares y en el interior puede acumularse. La concentración de radón se mide en Bq/m<sup>3</sup>, esta unidad corresponde a las desintegraciones por segundo de átomos de radón en un volumen de aire de un metro cúbico. El radón se puede medir con dispositivos activos y pasivos, dependiendo de si necesitan fuente de alimentación para muestrear. Además, para las mediciones de la concentración de radón, se debe tener en cuenta el período de muestreo:

- a) Medición a corto plazo: Medición rápida de las concentraciones de radón en el medio ambiente, este período corresponde de 2 días a 3 meses. Este tipo de medición en viviendas es poco fiable, debido a la alta variación temporal (menor ventilación por ventanas cerradas o viceversa, temperatura, humedad, etc.)
- b) Medición a largo plazo: Medida realizada durante un período de entre 3 meses y un año. Este tipo de medición es la que se debe tener en cuenta para una vivienda, excepto cuando en mediciones de corto plazo la concentración de radón es muy alta.

La medida de la tasa de exhalación del radón se obtiene con un detector y una cámara de almacenamiento donde el gas alcanza un equilibrio, que es necesario para que sea detectable. Dado que esta situación es difícil de lograr, se desarrollan nuevos métodos de cálculo de la tasa de exhalación basados en el concepto de no equilibrio (**Tan et al., 2011**). Existen detectores de radón pasivos de respuesta rápida, que utilizan una concentración electrostática con electrónica de lectura mejorada, cuyo tiempo de respuesta después de la ignición es inferior a 2 horas (**Griffin et al., 2011**). La aplicación de estos detectores es múltiple; existen estudios en escuelas y edificios públicos donde se utilizan redes de sensores para monitorizar casi en tiempo real la concentración de gas radón (**Amato et al., 2019**) y otras mediciones realizadas en agua de pozo, grifo o embotellada (**Elmehdi et al., 2019**).

### 3.2 Diseño de nodos de sensores

En este trabajo presentamos el diseño de un nodo sensor, que registra temperatura seca, temperatura operativa, HR, CO<sub>2</sub>, Radón y luminosidad. El diseño del nodo se realiza en varias etapas. El primer prototipo autónomo medía y registraba T<sup>a</sup> seca y HR, con sensor electrónico, a intervalos de 15 minutos y con una autonomía de 3 meses, permitiendo monitorizar un recinto desde el montaje de la instalación *HVAC* y estudiar el resultado de su funcionamiento (este dispositivo es el usado en el estudio del Capítulo 4). En la siguiente etapa se integra el sensor óptico de CO<sub>2</sub>, que debido a su alto consumo reduce la autonomía a 5 días, debiéndose optar por una batería de mayor capacidad. En la última etapa se añade el sensor de la temperatura de globo, luminosidad y radón.

Características del nodo sensor resultante:

1. Funciona de forma autónoma, conectado a toma eléctrica.
2. Utiliza conexión inalámbrica y registra datos en una tarjeta microSD, con fecha y hora.
3. Utiliza un sensor de adquisición de T<sup>a</sup> y HR de bajo coste y buena precisión (DHT22).
4. Utiliza un sensor de CO<sub>2</sub> de infrarrojos, de bajo coste y alta precisión (MH-Z14A).
5. Utiliza un sensor de luz (TSL2591) de bajo coste y buena precisión.
6. Utiliza un sensor de T<sup>a</sup> globo, mediante una semiesfera negra con un sensor (DHT22) para determinar la T<sup>a</sup> operativa.
7. Reproducible, empleando componentes que se pueden encontrar fácilmente en el mercado.
8. Facilidad de uso. El tratamiento de las medidas está accesible en tiempo real mediante un dispositivo móvil a través de la aplicación Blynk y/o tarjeta de memoria para recopilar los datos registrados en el periodo de tiempo programado, generalmente cada 15 minutos.
9. Tamaño reducido. Fácilmente transportable.

El planteamiento inicial fue desarrollado en base a la plataforma Arduino, gracias a la flexibilidad, expansión y posibilidades de mejora que presenta el sistema y porque es una

plataforma de desarrollo basada en *software* libre y *hardware* de amplia difusión. Las diferentes versiones de placas y sus múltiples accesorios se pueden encontrar a muy bajos costes en comparación con otras plataformas similares. Está programado en un lenguaje similar a C++. La curva de aprendizaje no es compleja y lo aprendido se puede utilizar para desarrollar otros proyectos. Una persona con pocos conocimientos de programación puede comenzar a usar Arduino en unas pocas horas. Para conectarlo al ordenador, requiere un convertidor USB-UART con un pin DTR. Se incorpora un módulo de reloj RTC DS3231 para obtener una fecha precisa ya que el reloj interno del Arduino se apaga y se reinicia cuando hay un corte de tensión y el módulo lector SD se encarga de guardar las medidas tomadas.

El primer modelo utilizado de Arduino fue el Pro Mini, en el cual el consumo de energía se reducía debido a su voltaje de 3.3V y su frecuencia de operación de 8 MHz y por lo tanto se obtiene más autonomía de operación. Se podía medir T y RH utilizando el sensor DHT22, pero no se pudo integrar el sensor de CO<sub>2</sub> debido a su voltaje de operación de 5V, esto se soluciona con el segundo modelo utilizado que emplea el Arduino Nano, con un consumo de 20 mAh, donde se integró con éxito el sensor infrarrojo de CO<sub>2</sub> o MH-Z14A.

El sensor DHT22 no es muy rápido para realizar muchas medidas en poco tiempo, pero tiene buenas prestaciones a un coste razonable. En las pruebas realizadas ha resultado un sensor muy apropiado y con una precisión adecuada.

El sensor de CO<sub>2</sub> ensayado es el MH-Z14A, es de gas no dispersivo con sensor de temperatura incorporado, consumo de 6,45mAh, requiere de tres minutos de calentamiento, tiene una resolución de 0 a 5000 ppm, tres interfaces de medida, calibración manual y sensibilidad baja. Queda el sistema constituido por un Arduino Nano con la salida a 3,3V para el reloj, lector de SD y el sensor DHT22 y para la tensión de 5V el sensor MH-Z14A y una batería recargable de Ni-MH de 9 celdas a 1,2V con una capacidad de 3000 mAh que suministra la energía necesaria para la toma y registro de medidas durante varios días.

El tercer modelo implementa una placa de desarrollo NodeMCU versión 1, con un microcontrolador llamado módulo WIFI ESP8266, que se puede programar como un Arduino, e incorpora el sensor DHT22, el sensor de CO<sub>2</sub> MH-Z14A y el nuevo sensor de radón GDK101, además de una batería en línea como fuente de alimentación, que tiene dos salidas de 5 V y 9 V y una capacidad de 800 mAh.

En el cuarto modelo se opta por una alimentación directa y se añaden los sensores de T<sup>a</sup> de globo y luminosidad, con un NodeMCU versión 3, cuyas características más relevantes son la programación con el IDE de Arduino a través del puerto USB y la salida de 5V para alimentar a otros periféricos, además de la transmisión de los datos vía Wifi gracias al chip ESP8266 de bajo coste y bajo consumo.

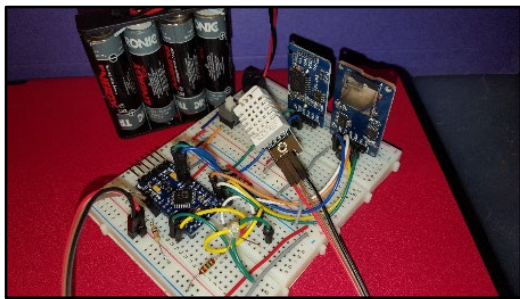
El nuevo nodo presenta una modificación en la fuente de alimentación del sensor DHT22, siendo ahora de 3,3V para disminuir el consumo. Se mantiene el tipo de comunicación con



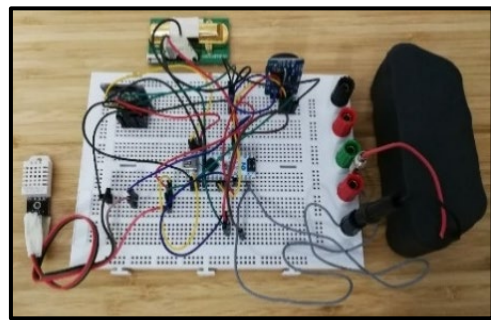
el sensor MH-Z14A y se tiene en constante funcionamiento para ahorrar el tiempo de precalentamiento y el consumo de 150mA en el arranque. El uso del sensor GDK101 para medir la radiación gamma y el sensor de temperatura de globo ( $T_g$ ) que servirá para conocer la temperatura operativa ( $T_o$ ).

El nuevo sensor digital de luz TSL2591 es de alta precisión, permite mediciones por diferentes vías: infrarrojos, amplio espectro y luz visible al incluir diodos infrarrojos y de espectro completo. Se trata de una gran ventaja frente a la mayoría de sensores de este tipo que sólo disponen de infrarrojos, luz que los humanos no podemos percibir. Su conversor analógico digital integrado lo hace más versátil.

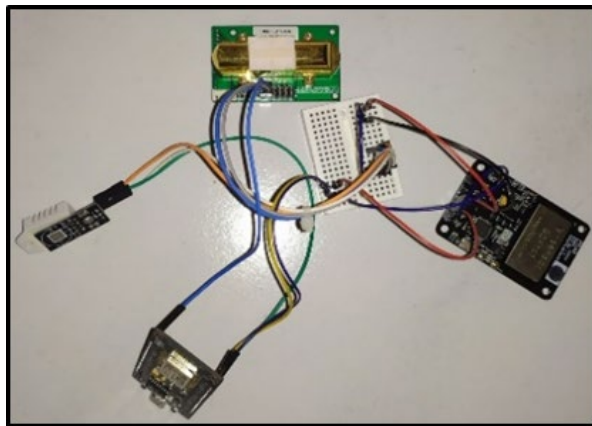
El desarrollo del nodo sensor se puede ver en la Fig. 3.1.



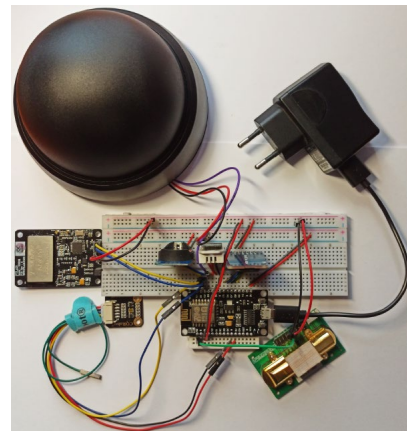
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.1: Prototipos desarrollados a) Temperatura seca y humedad relativa. Pilas, reloj y micro SD. Arduino Pro Mini. b)  $T^a$  seca, HR y sensor de  $CO_2$  con batería recargable. Arduino Nano c) Sensores conectados a Wifi. Nuevo sensor de radón y NodeMCU V1 d) Sensores de  $T^a$  globo, luminosidad. Reloj y micro. SD. NodeMCU V3.

Para medir la temperatura operativa,  $T_o$ , hay que conocer la temperatura radiante media,  $T_{rm}$ , y la temperatura seca del aire ambiente,  $T_a$ , para ello utilizaremos el sensor de  $T^a$  de globo.

La ecuación es la siguiente:

$$(3.1) \quad T_o = \frac{h_c T_a + h_r T_{rm}}{h_c + h_r},$$

donde  $h_c$  y  $h_r$  son los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación.

Para el caso concreto de que estos coeficientes sean iguales, la ecuación se simplifica a:

$$(3.2) \quad T_o = \frac{T_a + T_{rm}}{2},$$

ecuación que se cumple con frecuencia y se da en ambientes donde la diferencia de temperaturas  $T_a$  y  $T_{rm}$  es menor de 5°C y la velocidad del aire es menor de 0,2 m/s. Esto ocurrirá normalmente en oficinas, aulas, despachos y recintos similares, acondicionados. (ver anexo G de la norma **UNE EN ISO 7726-2002**).

Para calcular la  $T_{rm}$ , se usa un termómetro de globo negro (ver anexo B de la norma **UNE EN ISO 7726-2002**). Este globo negro tiene unas dimensiones concretas (diámetro 15cm), y en su interior hay un termómetro seco. Hay artículos como el de **Aparicio P. et al. (2016)** que usa dimensiones más pequeñas y compara resultados. La temperatura que mide este instrumento se denomina temperatura de globo,  $T_g$ , siendo una temperatura de equilibrio entre la temperatura radiante del lugar y la convección producida por la velocidad del aire.

La ecuación que determina la  $T_{rm}$  depende del tamaño del globo y del tipo de convección, si es natural o forzada. Para un tamaño normalizado y convección forzada, donde la emisividad se ha sustituido por el valor 0,95 al ser el globo negro, se tiene la siguiente ecuación que es la más usada:

$$(3.3) \quad T_{rm} = \left[ (T_g + 273)^4 + \frac{h_{c,g}}{\varepsilon_g \sigma} (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273,$$

donde  $h_{c,g}$  para ventilación forzada se puede sustituir por:

$$(3.4) \quad h_{c,g} = \frac{6,3V^{0,6}}{D^{0,4}},$$

y  $V$  es la velocidad del aire. Simplificando se llega a:

$$(3.5) \quad T_{rm} = \left[ (T_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \times V^{0,6} (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273$$

Hay otras ecuaciones como la de Fanger, quizás más sencilla, pero de cualquier forma la  $T_{rm}$  hay que determinarla operando y calculando la velocidad del aire en el recinto que, si está cerrado con aire acondicionado por difusores de techo, de pared o de suelo, se podría considerar una velocidad del aire de 0,2 m/s a la altura de la cabeza en condiciones normales para una persona de pie o incluso menor si está sentada.

En el artículo de **Aparicio et al. (2016)**, que usa Arduino para hallar la  $T_{rm}$  y con ella la  $T_o$ , considera una resistencia y un termistor para conocer la  $T_g$ , y usa esferas pequeñas de 40 mm (pelota de ping-pong) obteniéndose resultados similares a los obtenidos con una esfera de 150 mm de diámetro.

Para medir la  $T_g$ , se ha utilizado un sensor DHT22 colocado en el interior de la semiesfera negra y otro en el exterior para medir la  $T_a$ .

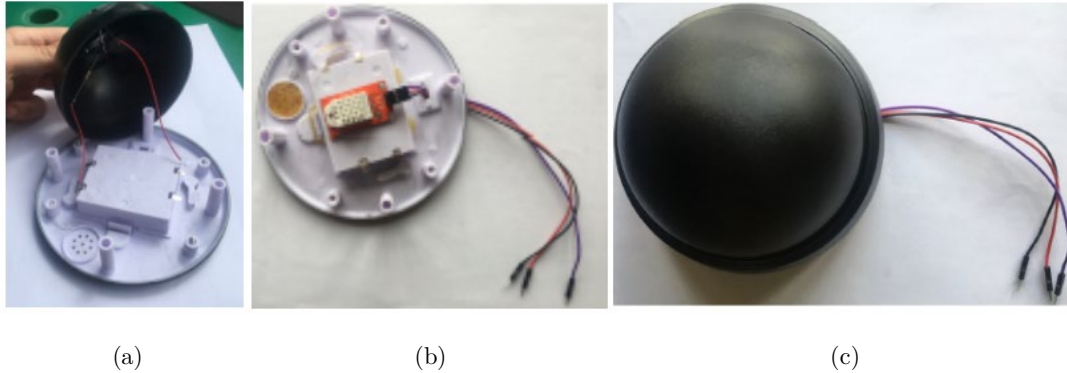


Fig. 3.2: Fabricación del termómetro de globo. Semiesfera negra y sensor DHT22. (a) dispositivo empleado para ubicar la construcción del sensor de globo, (b) introducción del sensor de temperatura seca y humedad relativa, c) sensor terminado.

Las medidas de radón se han realizado con un sensor de radiación gamma de bajo coste GDK101. La relación que existe entre la radiación gamma y la concentración de radón existente viene determinada por la siguiente ecuación:

$$(3.6) \quad T_{total} = 0,1887 \cdot \frac{CRn \cdot H \cdot (\lambda + t_v)}{E \cdot \rho \cdot \sqrt{\lambda \cdot D}} + 0,4510,$$

donde  $T_{total}$  es la tasa de exposición ( $\mu R/h$ );  $CRn$  es la concentración de radón ( $Bq/m^3$ );  $H$  es la altura de la habitación;  $\lambda$  es la constante de desintegración del radón, cuyo valor es de  $2,1 \cdot 10^{-6} s^{-1}$ ;  $t_v$  es la tasa de renovación del aire, cuyo valor se ha establecido en  $2,7 \cdot 10^{-3} s^{-1}$ ;  $E$  es el coeficiente de emanación, cuyo valor es de 0,25;  $\rho$  es la densidad del suelo, cuyo valor se ha establecido en  $1600 kg \cdot m^{-3}$ ;  $D$  es el coeficiente de difusión, cuyo valor se ha establecido en  $2 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ . Como la tasa de exposición se mide en  $\mu R/h$  y el sensor de radiación mide en  $\mu Sv/h$ , es necesario hacer un cambio de unidades, siendo el factor de conversión 114R/Sv.

De esta forma, para obtener la concentración de radón en  $Bq/m^3$ , se despeja de la ecuación (3.6):

$$(3.7) \quad CRn = \frac{(114 \cdot T_{total} - 0,4510) \cdot E \cdot \rho \cdot \sqrt{\lambda \cdot D}}{0,1887 \cdot H \cdot (\lambda + t_v)}$$

Para realizar estos ensayos, se usan dos fuentes de emisión de radiación, Radio – 226 y Cobalto – 60, las cuales se situarán a diferentes distancias de los sensores, de forma que se aprecie el aumento de radiación al aproximar los sensores a la fuente y su disminución al

alejarnos. Los ensayos se han realizado cada 5 minutos. Se han utilizado dos sensores de radiación gamma, Minitrace  $\gamma$  y Berthold UMo LB 123, además de otro que mide directamente la concentración de radón, AlphaGuard (Rn).

### 3.3 Ensayos y ajustes de medida

Los ensayos de  $T^a$  de Globo,  $T^a$  seca, HR y luminosidad se han realizado en espacios interiores de la Escuela de Ingenierías Industriales de Málaga, excepto los ensayos de calibración del sensor de gas radón que se hizo en el SCAI (Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación).

En la Fig. 3.3 se observan saltos bruscos de  $T^a$  de globo que corresponden a condiciones diferentes de ensayos realizados en el laboratorio de la Escuela. El primer tramo se obtiene al colocar 4 focos de 1000W a una distancia de 20cm donde la temperatura es máxima; el segundo a la misma distancia y con 2 focos y finalmente, colocando los sensores al doble de distancia. En la Fig. 3.3 se muestra más de 60 muestras de medida donde el sensor fabricado sigue la tendencia del instrumento testo 480. Bastará con ajustar el error para conseguir un comportamiento adecuado a un equipo de medida específico de mayor precisión.

En cuanto a la temperatura seca, el sensor DHT22 también sigue la tendencia del instrumento de referencia testo 720 y prácticamente sólo necesitamos realizar un pequeño ajuste promediando los ensayos, como se representa en la Fig. 3.4.

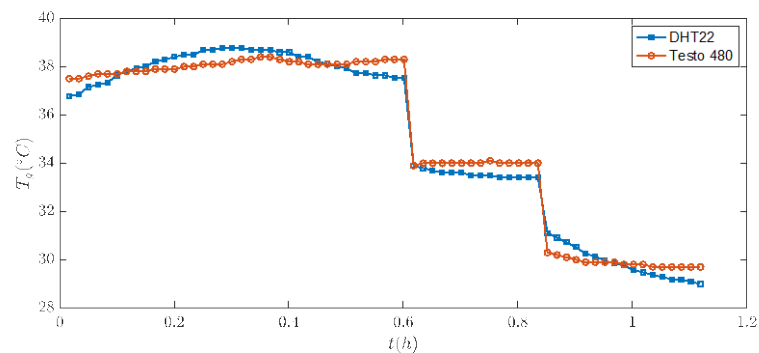


Fig. 3.3: Ensayos para medir la temperatura de globo y ajuste de la medida con el equipo de referencia Testo 480.

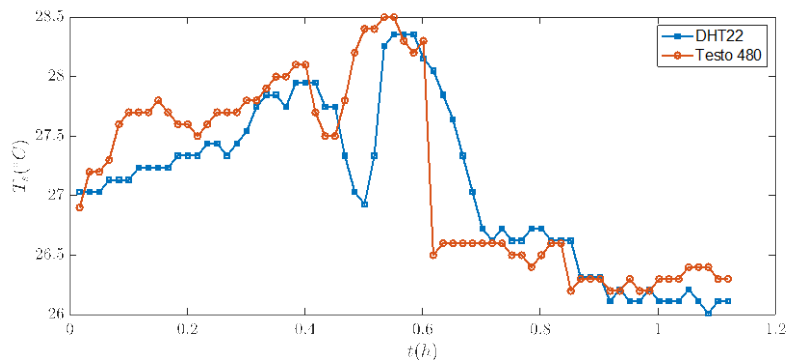


Fig. 3.4: Medidas obtenidas con el nodo sensor:  $T_s$ (°C).

Respecto a la HR podemos considerar que el sensor DHT22 se ajusta a la medida del instrumento de referencia, Testo 480, sin necesidad de corregirlo, como se observa en la Fig. 3.5. Además, los ensayos realizados para comprobar la HR dentro del sensor de la temperatura de globo proporcionaron una variabilidad máxima del 3%, garantizando su estanquidad.

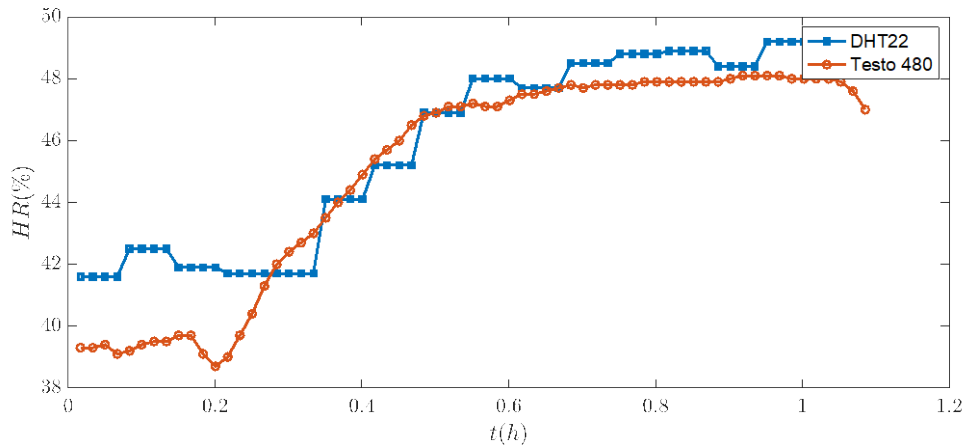


Fig. 3.5: Medidas obtenidas con el nodo sensor: HR (%).

Para el ensayo de luminosidad se hicieron 4 experimentos diferentes en el laboratorio para proporcionar distintas medidas. Cada uno de los ensayos se realizaron para trabajar en el rango de luxes que se puede dar en interiores, según se puede observar en la Fig. 3.6. En todo el proceso se comprueba que el medidor TSL2591 sigue el comportamiento del testo 480 con un error que se puede corregir con una sencilla calibración.

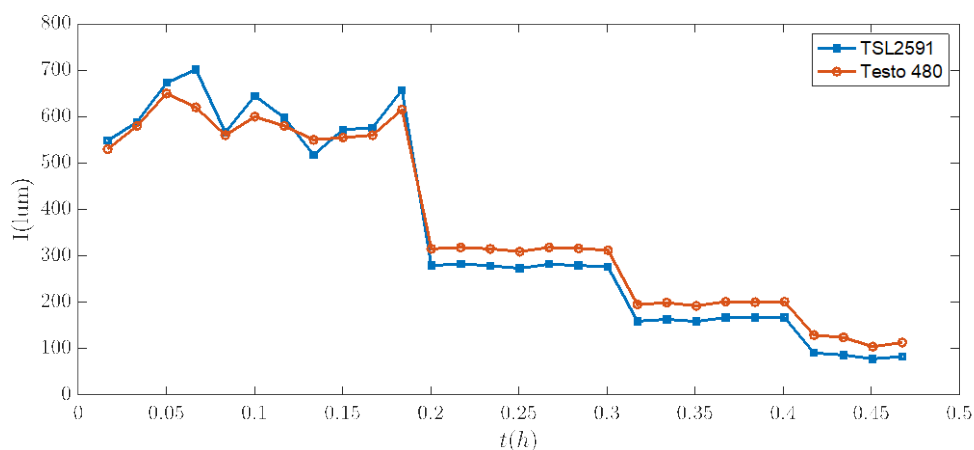


Fig. 3.6: Ensayos para medir la luz ambiente y ajuste de la medida con el equipo de referencia Testo 480. Sensor de luz: TSL2591.

Los ensayos de CO<sub>2</sub> se realizaron en un aula de informática de la Escuela mientras se impartía docencia durante una hora y media. El sensor estaba colocado sobre la mesa del profesor, en ausencia de climatización y con las puertas cerradas. Las medidas realizadas

muestran una gran concordancia entre el sensor MH-Z14A y el de referencia Testo 480, no siendo necesaria una corrección del error cometido según se muestra en la Fig. 3.7.

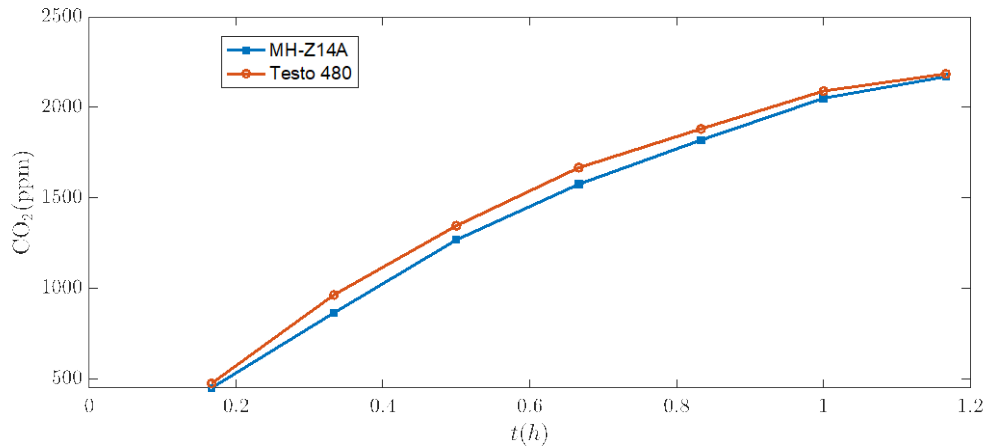


Fig. 3.7: Medidas obtenidas con el nodo sensor: CO<sub>2</sub> (ppm).

En la Fig. 3.8 se muestran las medidas de radiación en Bq/m<sup>3</sup> del sótano de la Escuela, obtenidas mediante ensayos realizados con el sensor GDK101 y convertida posteriormente con la ecuación (3.7) que proporciona la concentración de radón.

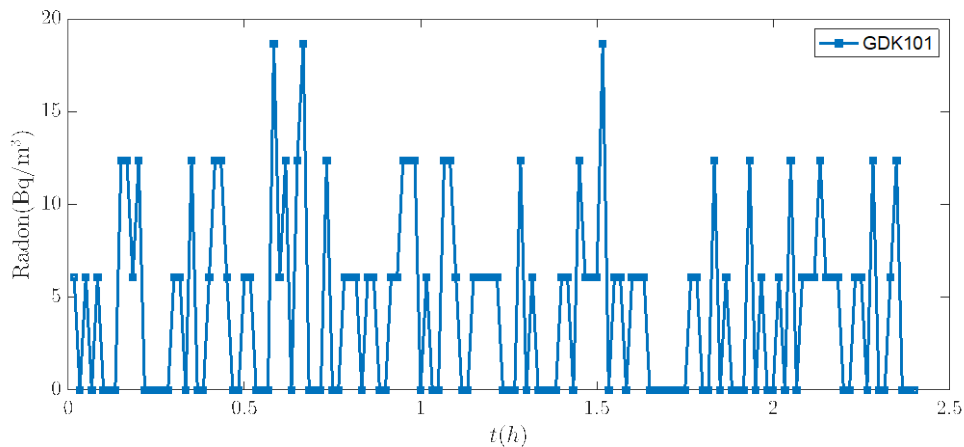


Fig. 3.8: Medidas obtenidas con el nodo sensor: Radón (Bq/m<sup>3</sup>).

### 3.4 Conclusiones

Se ha desarrollado un sensor de medida de distintas variables necesarias para verificar el confort y la salubridad en espacios interiores. El dispositivo ha pasado por distintas fases de diseño, y el último modelo es capaz de medir la temperatura de globo  $T_g$ , la temperatura seca  $T_s$ , la humedad relativa HR, la luminosidad I y las concentraciones de CO<sub>2</sub> y Radón. Se han realizado experimentos de calibrado con los equipos de precisión Testo 480 y Testo 720. Como era de esperar, los valores de  $T_o$  obtenidos mediante la  $T_g$  son prácticamente coincidentes. Como se ha indicado, esto ocurre cuando  $T_{rm} > T_g$  y  $T_a$  presenta una diferencia no superior a 5°C de la  $T_g$ . Los resultados de temperatura seca y humedad relativa obtenidos con el sensor DTH22 demuestran una gran precisión no necesitando calibración. Por otro

lado, el sensor de luminosidad TSL2591 requiere de una calibración de la medida para que coincida con el instrumento de referencia, tras el cual proporciona una medida exacta.

En cuanto a la concentración de gases, las medidas realizadas con el sensor de CO<sub>2</sub>, MH-Z14A, son coincidentes con las medidas de referencia, necesitando realizar un ligero ajuste para disminuir el error de medida. Por otro lado, el sensor de radiación GDK101 que mide la radiación gamma es apropiado para medir la concentración de gas radón utilizando las ecuaciones de conversión de unidades.





# CAPÍTULO 4

## REHABILITACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA VILLA MEDITERRÁNEA MEDIANTE MEDICIONES IN SITU Y SIMULACIÓN INFORMÁTICA

*Este capítulo ha sido elaborado con la colaboración de Alberto Fernández-Gutiérrez, Francisco Fernández-Hernández y Luis Parras, y fue publicado en la revista Journal of Building Engineering (J. Build. Eng. 35, 102083, 2021).*

En esta investigación se llevó a cabo un estudio de rehabilitación completo de una villa aislada en un clima mediterráneo con el fin de mostrar cómo una rehabilitación de un edificio con una combinación de estrategias simples pasivas y activas puede mejorar la sostenibilidad, la eficiencia energética y el confort térmico. Esto se realiza gracias a un método de trabajo basado en el uso de una herramienta de simulación térmica con medidas experimentales obtenidas mediante un dispositivo desarrollado para esta función, basado en una plataforma *hardware* de código abierto de bajo costo, para evaluar las medidas de ahorro energético y analizar el confort térmico.

Para ello, se realiza en primer lugar un estudio de las necesidades de la vivienda para posteriormente diseñar las diferentes actuaciones en la rehabilitación, utilizando en la medida de lo posible, materiales ecológicos en su desarrollo. Básicamente, se aíslan paredes y techos, se instalan tres colectores solares de aire para mejorar la ventilación y reducir la demanda de calefacción, y se instalan dos estufas de pellet.

Finalmente, la casa reformada se modela y simula en *EnergyPlus* (**EnergyPlus, 2020**) para comparar con las medidas realizadas in situ mediante un Sistema de Monitorización de Código Abierto (*OSMS*) desarrollado para esta investigación en Arduino, obteniendo buenos resultados sin necesidad de calibrar el sistema. Se comparan los resultados de la demanda energética y el consumo de calefacción de la vivienda antes y después de la reforma, proporcionando una disminución de la demanda del 66% y una disminución del consumo energético del 50% en la temporada de invierno. El 60% de dicho consumo es cubierto con fuentes renovables. En términos de confort térmico, la comparación de los valores *PPD* y *PMV* muestra una mejora en la casa tanto en la temporada de calefacción como en la de refrigeración.

#### 4.1 Descripción del caso de estudio

El proyecto arquitectónico sobre el que se realizará el caso de estudio consiste en la rehabilitación energética de una villa (se muestra una vista de la construcción en la Fig. 4.1) donde las soluciones adoptadas están pensadas específicamente para una persona que padece los síndromes conocidos como *MCS* y *EHS* (Sensibilidad Química Múltiple e Hipersensibilidad Electromagnética). La premisa de partida es la calidad del aire en los espacios interiores de la vivienda como factor determinante en las actuaciones a adoptar. La transpirabilidad de las paredes, la oxigenación del ambiente y la renovación continua del aire permitirán que la casa cuente con las condiciones ideales para el confort en general, así como para la obtención de espacios saludables en particular. El proyecto se lleva a cabo mediante dos estrategias de intervención: soluciones pasivas y activas.

Las soluciones pasivas propuestas consisten en aislar la envolvente de la vivienda para evitar pérdidas/ganancias de energía y sustituir las carpinterías exteriores por otras más eficientes en términos de comportamiento energético. El material utilizado para el aislamiento es corcho natural de 50 mm de espesor, mediante el sistema denominado SATE (Sistema de Aislamiento Térmico Exterior). Por último, también se utilizan pinturas térmicas en toda la vivienda (pintura ecológica cuyos compuestos reflejan el calor, impidiendo que penetre en el edificio).



Fig. 4.1 Fotografía de la villa aislada mediterránea.

En cuanto a las estrategias activas utilizadas, se implementa un sistema de calefacción/ventilación/deshumidificación con colectores solares que renuevan el aire proporcionando un salto térmico de unos 5°C en las horas de luz solar invernal. Un termostato controla la temperatura y la humedad necesarias para el confort, de modo que en verano el sistema invierte la circulación del aire, permitiendo que el aire entre por las zonas bajas de la fachada norte, que son más frías, y extrayendo el aire caliente por zonas

más altas mientras el aire se renueva. También se implementa un sistema de estufas de biomasa (pellets) como sistema complementario al anterior.

## 4.2 Metodología

Este proyecto de renovación se desarrolló durante el año 2015. Antes de realizar las obras de la vivienda, se acordaron con los propietarios los requisitos precisos de ventilación y sus hábitos en la vivienda. Una vez obtenida esta información, se realizó un estudio termográfico de la vivienda utilizando una cámara FLIR, modelo E50, para identificar los puentes térmicos y las principales fugas de calor. Se observó que las ventanas eran una de las fuentes más importantes de pérdida de calor como se puede observar en el ejemplo de la imagen mostrada en la Fig. 4.2. Por otro lado, se realizó una prueba de estanqueidad *Blower Door* de acuerdo a la **Norma ISO 9972**. Para ello se utiliza un manómetro digital de precisión modelo DG-700. De esta prueba se obtuvo un resultado de 1.334 renovaciones/hora antes de la renovación. Todos estos datos se utilizaron para calcular la demanda energética y ayudar a diseñar las acciones a realizar para reducirla. Desafortunadamente, los dispositivos de monitorización aún no estaban desarrollados, por lo que no hay mediciones como la temperatura del aire y la humedad relativa antes de la renovación.



Fig. 4.2 (a) Ejemplo de fotografía termográfica de la villa. (b) Misma fotografía en luz visible

Posteriormente, se realizaron las obras de rehabilitación de la vivienda y se llevaron a cabo las siguientes acciones, detalladas en el plano que se muestra en la Fig. 4.3. En primer lugar, se aislaron todos los recintos externos marcados con líneas rojas en dicha figura. Además, se incluyó aislamiento en el techo de la sala de estar y en el techo del dormitorio. En la Fig. 4.4 se muestra un detalle de los esquemas utilizados en los techos y muros. Los techos se aislaron de tres formas diferentes: en la cocina y comedor mediante el relleno de celulosa en un hueco trasdosado de 8 cm (Fig. 4.4(b)), en el dormitorio principal rellenando 30 cm de celulosa en la cámara de aire entre forjado y la cubierta (Fig. 4.4 (a)), y usando pintura térmica en la sala de estar (Fig. 4.3). Las paredes de la vivienda se aislaron mediante paneles de corcho de 5 cm, como se muestra en la Fig. 4.4(c). Otra acción realizada en la vivienda

fue el cambio de todas las ventanas marcadas en verde en la Fig. 4.3. Las nuevas ventanas son de doble acristalamiento con marco de aluminio y rellenas de gas argón.

Finalmente, los sistemas activos que se incluyeron en la casa fueron tres colectores solares de aire comerciales, marca SolarVenti, modelo SVX30, de 3 m<sup>2</sup> de superficie, con capacidad para renovar aire en el salón, el comedor y el dormitorio, cuya posición está marcada con rectángulos azules en la Fig. 4.3. El propósito de este tipo de dispositivo es suministrar aire fresco de ventilación desde el exterior, calentado con radiación solar. Así, hay una mejora en cuanto a ventilación e *IAQ* porque permite la entrada de aire fresco desde el exterior y no es necesario recircular aire. Pueden introducir un caudal máximo de aire exterior de 200 m<sup>3</sup>/h aportando un salto térmico de 5°C en periodos radiación solar en invierno. Un termostato controla la temperatura y la humedad necesarias para el confort, la estrategia de diseño contempla que en verano el sistema invierte la circulación del aire, permitiendo que el aire entre por las zonas bajas de la fachada norte, que son más frescas, y extrayendo el aire caliente por zonas más altas mientras el aire se renueva. Además, para completar los dispositivos activos para la calefacción de las diferentes estancias, el sistema *HVAC* actual: un suelo radiante eléctrico y varios splits colocados en las estancias principales son sustituidos por dos estufas de pellet con una potencia de calefacción de 8 kW, (marcadas en pequeños rectángulos en la Fig. 4.3, las cuales tienen un termostato que se mantiene a una temperatura de 20°C durante el tiempo que están encendidos. Una vez finalizado el proceso de rehabilitación, se realizó una nueva medida de la prueba *Blower Door*, obteniendo valores de 0,185 renovaciones/hora, es decir, una disminución del 86% de las infiltraciones de aire.

Se decidió realizar un estudio a posteriori del resultado de la renovación que nos permitiera conocer con precisión la mejora real de la vivienda. Con este objetivo, se valida un modelo *EnergyPlus* de la vivienda rehabilitada con datos reales de mediciones in situ. Posteriormente, se ha desarrollado un modelo de la vivienda inicial eliminando las mejoras introducidas en la renovación y se compara con los resultados del modelo validado de vivienda reformada en cuanto a confort térmico, *IAQ* y consumo energético, con datos reales de mediciones *in-situ*, así como simulaciones mediante programas comerciales. Estos resultados son los desarrollados en el presente estudio.

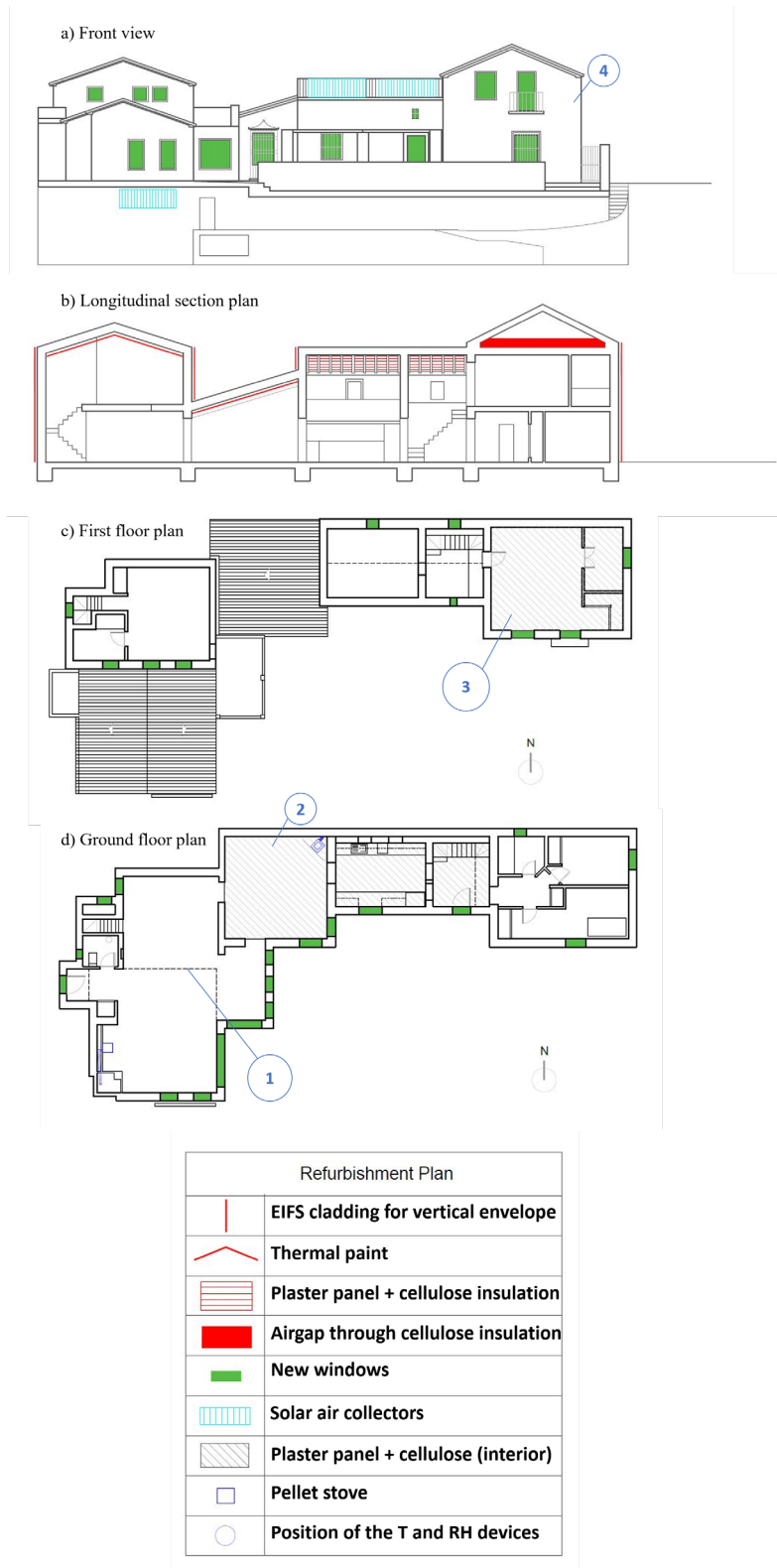


Fig. 4.3. Detalles de la reforma implementada en la villa. (a) vista frontal de la villa, (b) sección de la vista frontal y (c) vista frontal del edificio de dos plantas. La posición de los diferentes dispositivos de monitorización se muestra en círculos azules.

### 4.3 Modelo de simulación

La envolvente detallada del edificio se ha creado en el software *Openstudio*. En la Fig. 4.5 se muestra una imagen del resultado de este proceso. Para la modelización en *EnergyPlus* se ha consultado a los habitantes de la vivienda sobre sus hábitos de uso. De esta forma, se consideran en las simulaciones dos ocupantes en la vivienda todos los días. Por otro lado, se ha obtenido de las visitas a la vivienda, la potencia, ubicación y horas aproximadas de uso de todos los electrodomésticos. Para la iluminación hemos asumido un aporte de  $2,2 \text{ W/m}^2$ . Como uno de los habitantes tiene la enfermedad de SQM (Síndrome Químico Múltiple), las rutinas de renovación de aire son bastante precisas y se repiten todos los días de cada mes de la misma manera, como se describe en la Tabla 4.1. Además, las rutinas diarias de los ocupantes fueron descritas en detalle y son las que se muestran en la Tabla 4.2.

#### 4.3.1 Modelo SolarVenti

El dispositivo comercial Solarventi SV30AX es un de colector solar de aire. Consta de una estructura que soporta un panel de  $3 \times 1 \text{ m}^2$  de superficie pintada con revestimiento oscuro. Esta superficie se cierra en la parte superior con un simple vidrio que permite que haya una capa de aire entre el absorbedor y el vidrio. La parte inferior está abierta al ambiente y la parte superior tiene un ventilador que asegura un cierto flujo de aire. Normalmente, en los colectores solares clásicos, el flujo de aire se debe a la flotabilidad. **Yu et al (2019)** han propuesto recientemente un modelo simplificado en *EnergyPlus*, utilizando el método discreto para dividir el espacio entre el vidrio y el absorbedor en 5 subzonas verticales que están conectadas por el objeto *ZoneMixing*. La comparación mediante experimento mostró que este modelo simplificado proporciona un error en la diferencia de temperatura menor a  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  y para la capacidad calorífica y la eficiencia de captación de calor presentan errores relativos de 1.7% y 0.7% respectivamente.

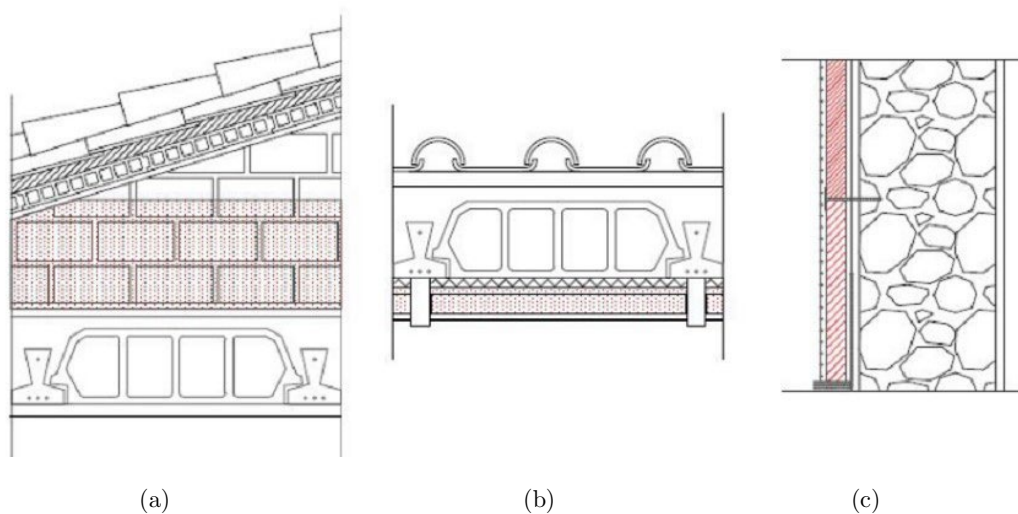


Fig. 4.4. Ejemplos de algunas de las técnicas de aislamiento empleadas (a) techo del dormitorio principal, (b) techo del salón y (c) muro exterior.



Month	Ventilation Schedule
From January to May	Windows opened 10 min in the morning
From June to September	Windows 24 hours opened
From October to November	Windows opened 10 min in the morning
December	Windows closed 24 hours

Tabla 4.1 Rutina de ventilación para los diferentes meses del año.

Room	Occupation
Living room	8:00-20:00
Dinning room	20:00-21:00
Bedroom	21:00-08:00

Tabla 4.2 Horario de ocupación de la villa.

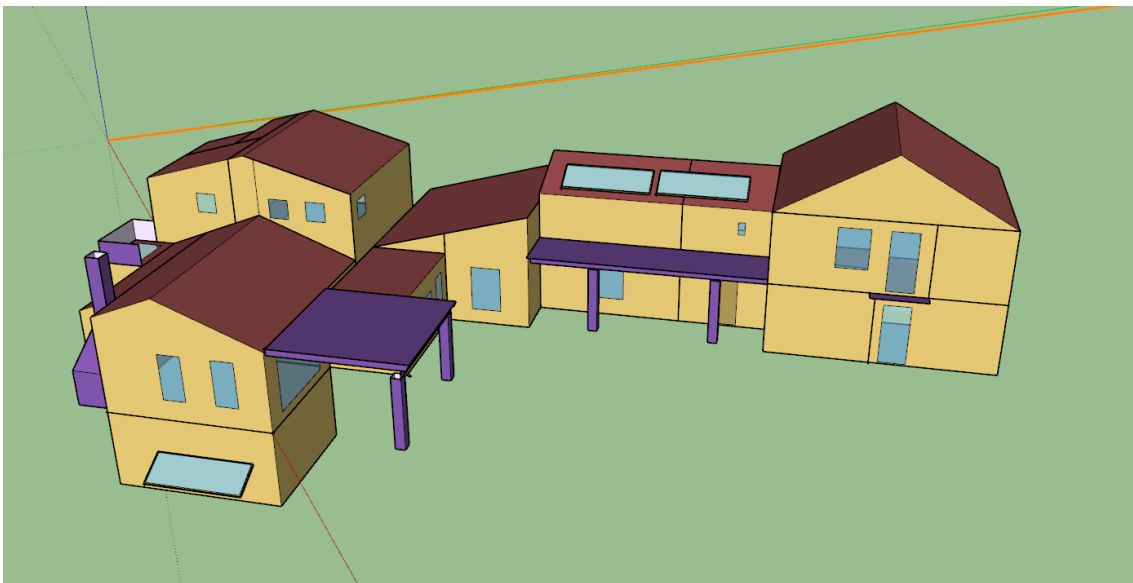


Fig. 4.5: Esquema 3D de la villa desarrollada en Openstudio.

Para implementar el efecto de los tres dispositivos SolarVenti instalados en *EnergyPlus*, hemos simulado tres nuevos espacios adyacentes a la villa. El dispositivo se ha modelado a través de un solo objeto *ZoneMixing* en *EnergyPlus*. A diferencia de **Yu et al (2019)**, que apuntan a un modelado preciso del colector de aire solar, esta investigación está interesada en el efecto de la renovación de la casa mejorando el aislamiento exterior de la envolvente, así como en la inclusión de colectores solares comerciales, y cambiando el sistema de calefacción de la casa. Dado que el efecto de los captadores solares es pequeño respecto al conjunto de medidas de mejora adoptadas, se ha optado por este modelo simplificado y posteriormente se comprobará su funcionamiento mediante mediciones in situ. El dispositivo se define mediante una carcasa exterior de aluminio que encierra un absorbedor de placa

plana de 3 m<sup>2</sup> pintado en negro con absortividad de 0,95. La base del colector es de material metálico y todo el absorbedor está cerrado por un solo vidrio. Además, se ha supuesto que el absorbedor está dirigido al sol y por lo tanto recibe energía de la luz solar, y que proporciona una tasa de infiltración constante durante el funcionamiento (cuando se usa el ventilador) igual al caudal nominal del dispositivo,  $\frac{\dot{m}_{SV}}{\rho} = 230 \text{ m}^3/\text{h}$ . En la Fig. 4.6 (a) mostramos un esquema del modelo utilizado en esta investigación para ser implementado en *EnergyPlus*, y (b) muestra un dispositivo SolarVenti SV30AX instalado en la cubierta de la villa.

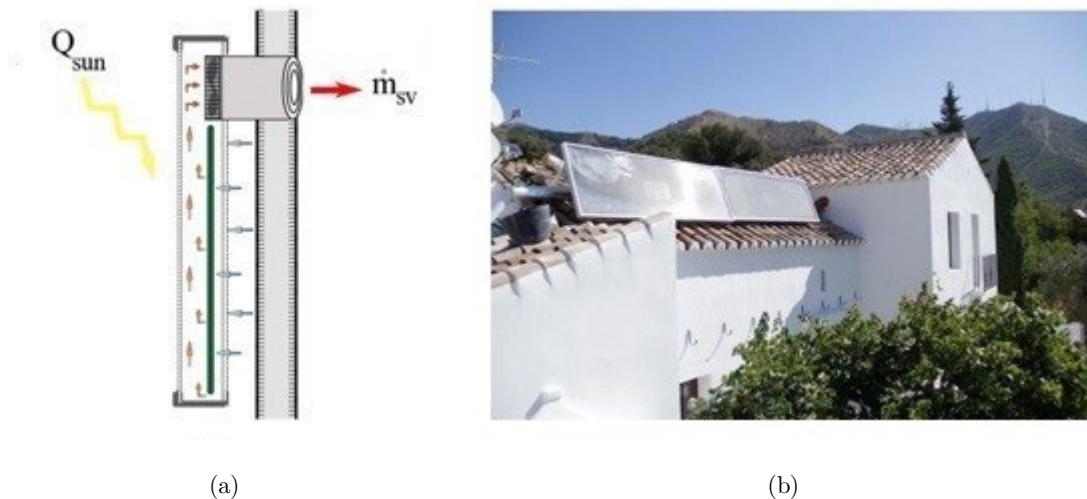


Fig. 4.6. (a) Boceto del Solarventi SV30AX para modelado en EnergyPlus. (b) Fotografía del dispositivo instalado en tejado.

#### 4.4 Medidas ambientales in situ

Durante años, los sistemas inalámbricos se han investigado y desarrollado utilizando plataformas de hardware de código abierto de bajo costo como Arduino o Raspberry Pi (Ferdoush et al., 2014, Akram et al., 2016), encontrando soluciones innovadoras para monitorizar la temperatura, humedad relativa, nivel de CO<sub>2</sub> y otros compuestos (Kaunelien et al., 2016), obteniendo resultados de medición que demuestran la utilidad de estos sistemas para evaluar la calidad del aire interior y el confort térmico (Karami et al., 2018).

A continuación, se describe el diseño de un sistema de medición y registro a largo plazo de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub>. El nodo sensor está basado en la plataforma Arduino y utiliza baterías como primera opción para la fuente de alimentación. Es una solución económica y fiable para el registro de datos de T, HR y CO<sub>2</sub> durante un período de tiempo suficientemente largo (meses) que permite el estudio del comportamiento de la casa con el fin de obtener suficiente información para contrastar el funcionamiento del sistema. Debido a la potencia necesaria para el sensor de CO<sub>2</sub>, las baterías tienen una vida útil más corta (días).



Estas son sus características:

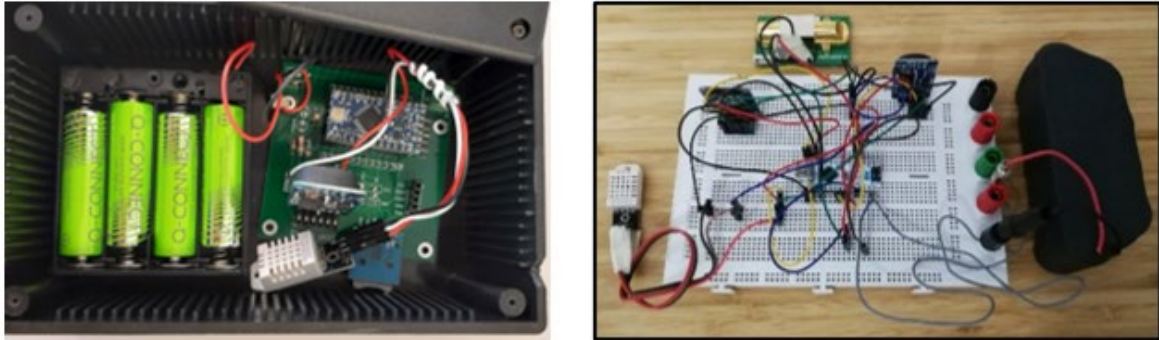
1. Funciona de forma autónoma, utilizando baterías estándar.
2. No utiliza WiFi ni Bluetooth.
3. Almacena datos de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> en una tarjeta microSD.
4. Utiliza un sensor de adquisición de humedad relativa (HR) y temperatura (T) de alta precisión y bajo costo, DHT22.
5. Utiliza un sensor de adquisición de CO<sub>2</sub> de alta precisión y bajo costo, MH-Z14A.
6. Reproducible, utilizando componentes que se pueden encontrar fácilmente en el mercado.
7. Fácil de usar, simplemente colocando las pilas y una tarjeta de memoria para el registro de datos.
8. Tamaño reducido.

El planteamiento inicial basado en la plataforma Arduino es por la flexibilidad, expansión y posibilidades de mejora que presenta el sistema y por ser una plataforma de desarrollo basada en *software* y *hardware* libre de amplia difusión y código abierto. Las versiones de la placa Arduino y sus muchos accesorios se pueden encontrar a un costo muy bajo en comparación con otras plataformas similares. Está programado en un lenguaje similar a C++. La curva de aprendizaje es suave y lo que se aprende se puede utilizar para desarrollar otros proyectos. Para conectarlo al PC se necesita un conversor USB-UART. Se incorpora un módulo de reloj DS3231 RTC para obtener la fecha con precisión ya que el reloj interno del Arduino se apaga y reinicia cuando hay un corte de energía, el módulo lector microSD se encarga de guardar las medidas tomadas.

Los modelos utilizados fueron el Pro Mini y Nano. Con el modelo Pro Mini se reduce el consumo energético y se obtiene una mayor autonomía de funcionamiento. La T y HR se pueden medir en períodos más largos (hasta 3 meses) y la principal razón de este bajo consumo se debe a su voltaje de 3.3 V y su frecuencia de operación de 8 MHz. Desafortunadamente, no fue posible integrar el sensor de CO<sub>2</sub> a este modelo debido a su voltaje de funcionamiento de 5 V y esa es la razón por la que desarrollamos un segundo dispositivo basado en el modelo Nano.

El sensor de T y HR utilizado es el DHT22. No es muy rápido para realizar muchas mediciones en poco tiempo, pero tiene un buen rendimiento a un costo razonable. Se han probado dos sensores de CO<sub>2</sub>; el MG-811 y el MH-Z14A, ambos operando a 5 V. El primero es un detector de gas que detecta componentes químicos en el aire, necesita 24 horas de calentamiento, potencia extra para el calentador, resolución de 0 a 10000 ppm y tiene buena sensibilidad y estabilidad. El segundo está basado en un gas infrarrojo no dispersivo con sensor de temperatura incorporado, consumo 6.45 mAh, requiere tres minutos de

calentamiento, la resolución varía de 0 a 5000 ppm. Después de varias pruebas con ambos sensores de CO<sub>2</sub>, finalmente se elige el MH-Z14A. La Fig. 4.7 muestra los dos sistemas utilizados para las mediciones. La Fig. 4.7 (a) muestra el primer dispositivo basado en un Arduino Pro Mini con baterías y los sensores T y HR y, en la Fig. 4.7 (b), el segundo basado en Arduino Nano con baterías para los sensores T, HR y CO<sub>2</sub>.



(a)

(b)

Fig. 4.7. (a) Dispositivo de medición que incluye Arduino Pro Mini, sensor de temperatura y humedad relativa con baterías y micro SD. (b) Protoboard para el desarrollo del dispositivo basado en Arduino Nano con sensor de CO<sub>2</sub> integrado.

La calibración de la T, HR y CO<sub>2</sub> de estos nodos sensores se realiza con el instrumento de medición multifunción Testo 480, que incorpora una sonda PT100 con una resolución de 0.01 °C y una sonda de humedad tipo capacitiva con resolución de 1% HR, mientras que la de dióxido de carbono, el sensor mide entre 0 y 10000 ppm con una resolución de 1 ppm de CO<sub>2</sub>. Los resultados de la calibración se muestran en la Fig. 4.8, y podemos observar que existe un coeficiente de correlación mayor a 0.97 en las tres variables medidas.

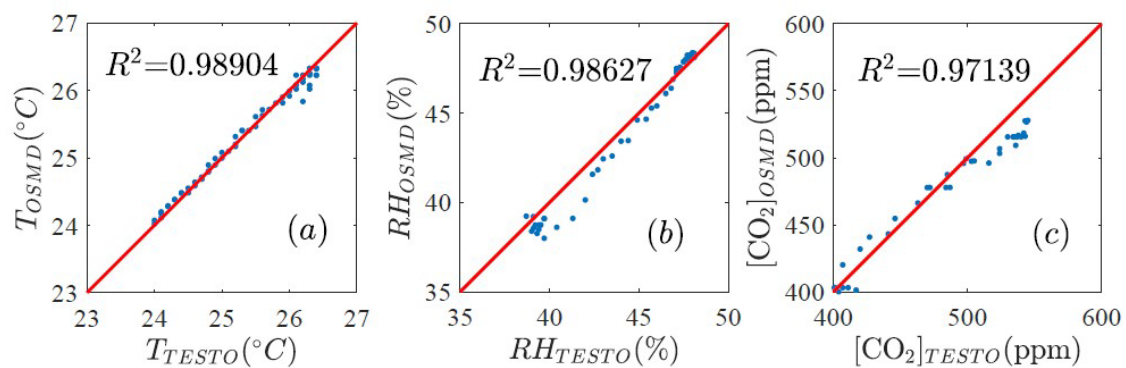


Fig. 4.8. Ejemplo de calibración del dispositivo de medición de código abierto (OSMD). (a) Temperatura, (b) Humedad Relativa y (c) Concentración de CO<sub>2</sub>.

## 4.5 Resultados

Para evaluar la efectividad de las mejoras de la rehabilitación, se realizó una comparación entre la vivienda inicial y la reformada. En primer lugar, se validaron los modelos *EnergyPlus* con las medidas experimentales, por lo que se pueden comparar los resultados

de la simulación de ambos modelos. A continuación, se analiza la mejora energética en términos de demanda de calefacción y consumo de energía eléctrica por los sistemas de calefacción. Se evalúa la contribución de las fuentes renovables. Finalmente, se realiza un análisis de confort térmico con la evaluación del *PPD* y *PMV* en el salón y dormitorio.

#### 4.5.1 Validación de los resultados

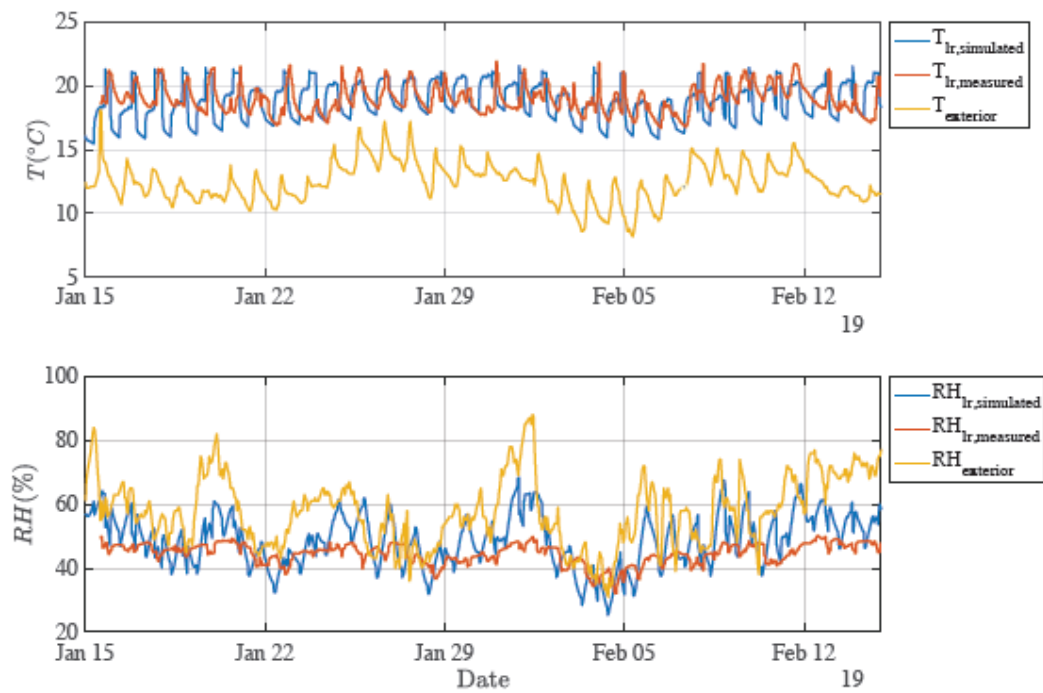
Se realizó una campaña de seguimiento durante un mes (del 15/1/2019 al 15/2/2019) para recoger la temperatura y la humedad relativa en tres estancias distintas de la villa, y en el exterior en la zona del cerramiento norte. Los resultados del seguimiento de los datos meteorológicos desde el exterior se utilizaron en el modelo de simulación en lugar del típico archivo climático de *EnergyPlus*, es decir, los valores de temperatura y humedad del aire exterior se toman de las mediciones externas en la casa y la irradiación solar será la media ponderada en altura de las tres estaciones meteorológicas que rodean la villa.

Los resultados de la simulación y las mediciones experimentales in situ en el salón y en el dormitorio principal se muestran en las Fig. 4.9 (a) y (b) respectivamente. Cabe mencionar que no se ha realizado ninguna calibración en el modelo, por lo que significa que la precisión de las mediciones in situ y la inclusión de las actividades reales que se desarrollan en la vivienda aportada por los habitantes (ocupación, ventilación, etc.) así como el coeficiente de transferencia de calor global modelado son muy precisos, al menos en el rango de temperaturas y humedad relativa en el interior de la vivienda.

Los errores observados en la simulación se deben principalmente al modelo simplificado utilizado, la imprecisión de los valores de los coeficientes de transmitancia de calor de la envolvente y las modificaciones de las rutinas de los habitantes. Como se indicó anteriormente, el archivo climático utiliza los datos de la temperatura exterior y la humedad medidos fuera de la vivienda junto con los datos de irradiancia tomados mediante un promedio en altura de estaciones cercanas. Sin embargo, los resultados de temperatura muestran una gran similitud con los medidos sin necesidad de calibración, lo que permite la validación de las simulaciones. Mostramos que los principales parámetros para realizar una simulación precisa sin necesidad de calibración son una buena estimación de los coeficientes de transferencia de calor en la envolvente, la caracterización adecuada de las rutinas de los habitantes en la vivienda y el uso en la simulación de las medidas in situ de temperatura y humedad relativa en el exterior de la vivienda.

Por otro lado, las medidas de humedad relativa proporcionan resultados promediados bastante similares, aunque la simulación muestra fluctuaciones más significativas en esta variable. El balance de humedad que realiza *EnergyPlus* proviene de la infiltración del aire exterior y la ventilación de la casa, y por otro lado los únicos aportes de humedad interior provienen de la ocupación de las personas.

(a) Living room



(b) Bedroom

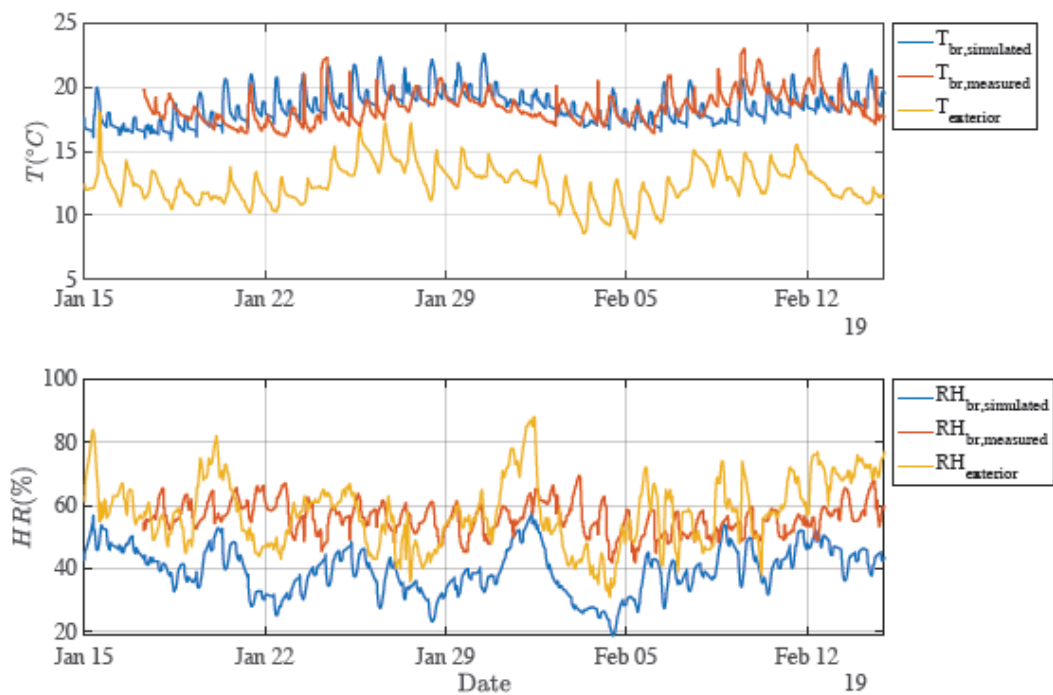


Fig. 4.9. Resultados de los experimentos y simulación para la temperatura y humedad relativa en (a) salón y (b) dormitorio principal.

#### 4.5.2 Efecto global de la renovación

Una vez validado el modelo en EnergyPlus con medidas reales, se puede explotar para aportar datos sobre el efecto de la reforma de la villa sobre la demanda de calefacción, consumo energético y confort térmico, para este caso concreto.

La Fig. 4.10 muestra la demanda mensual de calefacción de la vivienda inicialmente y con la remodelación, promediada durante cinco años diferentes. Las barras de error muestran la desviación estándar de las simulaciones para los cinco años elegidos. Se observa que no hay necesidad de calefacción durante 5 meses al año (de mayo a septiembre) mientras que la demanda máxima de calefacción se sitúa entre diciembre y enero, con un valor global de 1100 kWh para la villa reformada y 3300 kWh para la villa en su estado inicial, proporcionando una reducción del 66% en la demanda de calefacción de la vivienda.

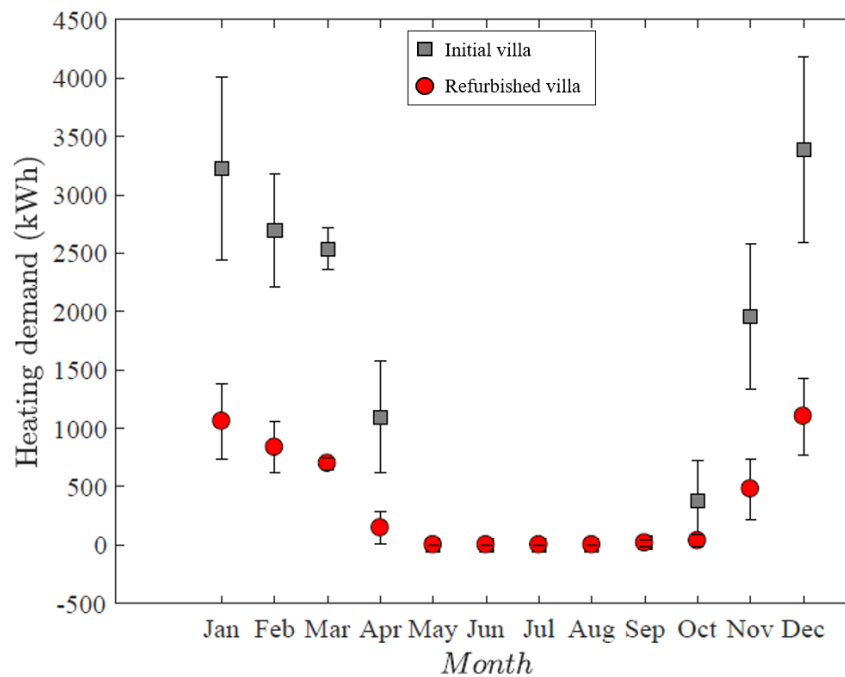


Fig. 4.10. Demanda media de calefacción de la villa durante cinco años, para el caso de la vivienda inicial (cuadrados) y la villa con la renovación realizada (círculos). La barra de error muestra la desviación estándar de los cinco años.

En la vivienda reformada, parte de la calefacción se obtiene mediante el aprovechamiento de la energía solar a través de los colectores *SolarVenti*, y el resto mediante estufas de pellet, por lo que todo el consumo de calefacción procede de fuentes renovables. Por último, el consumo eléctrico de los electrodomésticos es el mismo antes y después de la reforma, y se ha calculado incluyendo el tiempo estimado de uso de todos los electrodomésticos e iluminación. Los resultados descritos anteriormente se muestran en la Fig.4.11 para 5 años consecutivos, mostrando el promedio mensual y la desviación estándar para los diferentes años considerados. Se puede observar que el consumo eléctrico mensual estimado ronda los 710 kWh, y a través de las facturas de la luz se obtiene un consumo real de alrededor de 800 kWh. El cambio principal es la reducción del consumo total de energía, alcanzando alrededor del 50% en los meses de invierno como se muestra en la Fig. 4.12. Además, alrededor del 60% de la energía utilizada en la vivienda reformada proviene de fuentes renovables.

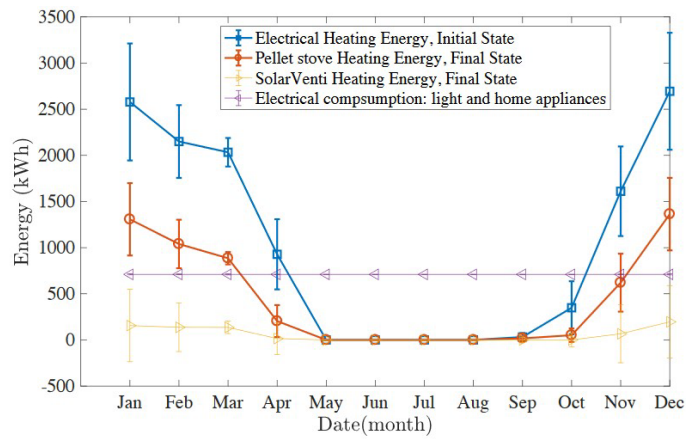


Fig. 4.11. Media mensual durante cinco años de la energía consumida para calefacción en la vivienda y su comparación con la vivienda renovada, tanto para estufas de pellet como SolarVenti. Se incluye el consumo eléctrico estimado en iluminación y electrodomésticos. Las barras de error son la variación estándar de los cinco años considerados.

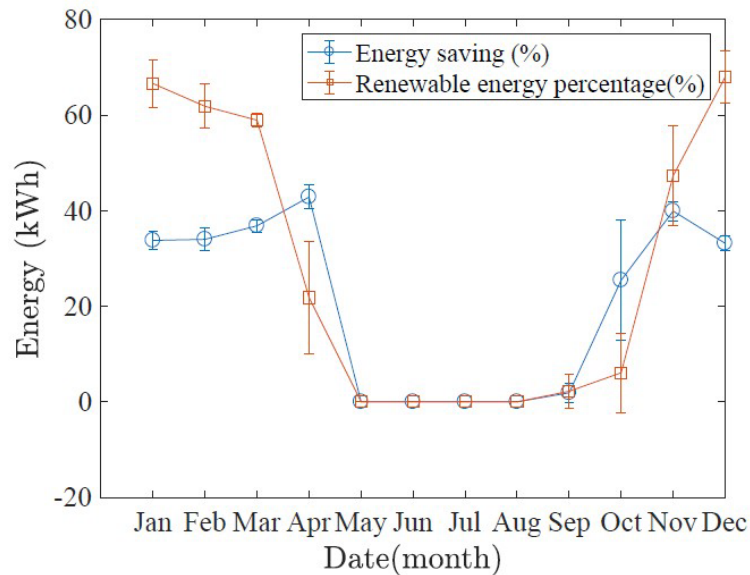


Fig. 4.12. Promedio mensual de cinco años de ahorro energético en la villa renovada respecto a la inicial, junto con el porcentaje de energía renovable en la energía total obtenida en la vivienda final.

En cuanto al confort térmico, cabe destacar que la reforma de la vivienda ha mejorado los requerimientos térmicos de los usuarios del edificio con mejores condiciones térmicas en la villa. La Fig. 4.13 muestra la comparación entre la villa inicial y la villa reformada en términos de valores promedio mensuales de *PPD* y *PMV* en las temporadas de invierno y verano. El modelo utilizado es el modelo Fanger Comfort según la norma **ISO 7730**. Las variables relacionadas con el cálculo de los parámetros de confort son el nivel de actividad, la eficiencia del trabajo, la velocidad del aire y el nivel de aislamiento de la ropa, descritos en la Tabla 4.3. Los parámetros son diferentes para salón y dormitorio, pero iguales para la vivienda inicial y reformada. La temporada de calefacción es de enero a marzo y de octubre a diciembre y la temporada de refrigeración es de mayo a septiembre. En el dormitorio, el



nivel de arropamiento se establece en 1,5 *clo* en invierno porque los habitantes de la vivienda duermen con ropa de dormir y se cubren con una colcha. En verano, se evalúa el nivel de vestimenta para la ropa típica de verano: camisa de manga corta y pantalón corto.

Parameter	Unit	Living room	Bedroom
Clothing insulation level	Clo	Heating season: 1	Heating season: 1.5
		Cooling season: 0.3	Cooling season: 0.5
Activity level	met	1.2	0.7
Air velocity	m/s	0.1	0.1
Work efficiency	W/m <sup>2</sup>	0	0

Tabla 4.3. Parámetros relativos al cálculo de los valores *PPD* – *PMV*.

Como puede observarse, comparando con la villa inicial, el efecto de las medidas ha sido significativo en el confort térmico. En invierno, el efecto del aire caliente de los colectores solares de aire tiene un efecto térmico positivo y, además con la incorporación de las estufas de pellet, los valores medios de *PMV* y *PPD* de la vivienda reformada en temporada de calefacción se mejoran considerablemente con respecto a la vivienda inicial. El *PMV* está entre -0,5 y 0,5 y el *PPD* es inferior al 10% en las zonas de salón y dormitorio.

En temporada de verano, el confort térmico se consigue en ambas situaciones. Los extractores colocados en la parte superior de la casa que extraen aire caliente son muy efectivos para reducir la demanda de refrigeración. Además, la ventilación es introducida principalmente por un ventilador colocado en la fachada norte, por lo que también se disminuye la carga de ventilación. En agosto se presentan situaciones con alta carga frigorífica que provocan malestar térmico con valores de *PMV* superiores a 0,5, pero el valor medio mensual es de 0,57 y 0,62 para la villa inicial y reformada, respectivamente. Por tanto, el objetivo de garantizar un alto nivel de confort térmico en invierno se consigue con valores similares tras la reforma en época de frío.

Desde el punto de vista de un análisis global de la rehabilitación, es muy interesante comparar la temperatura media radiante, las condiciones de humedad relativa del aire y los niveles de CO<sub>2</sub> de ambas habitaciones durante todo el período de calefacción con el fin de evaluar el efecto de la rehabilitación en el comportamiento térmico de la vivienda. La Fig. 4.14 (a) – (b) muestra la humedad relativa del aire y la temperatura del salón y del dormitorio de la villa en su estado inicial y posterior a la renovación y en (c) – (d) los resultados de la temperatura simulada y la concentración de CO<sub>2</sub>.

Cabe señalar que los resultados de la villa reformada se desplazan hacia la parte inferior derecha del gráfico aumentando la temperatura del aire y disminuyendo la humedad relativa del mismo. En primer lugar, en el salón de la villa en el estado inicial, hay un gran número de puntos con una temperatura inferior a los 15 °C y una humedad relativa superior al 60%,

que se han eliminado, teniendo una alta concentración de puntos en la villa reformada en un rango que oscila entre 17-21 °C y 40-60%. Con respecto al dormitorio, se destaca también que los usuarios de la villa en el estado inicial pasan mucho tiempo con un bajo nivel de confort térmico, con temperaturas entre 12-15 °C y altos valores de humedad entre 60-80%. El aislamiento de las fachadas y el efecto de las calderas de pellet son fundamentales para incrementar el confort térmico en el dormitorio con temperaturas superiores a los 16 °C. Con respecto a la concentración de CO<sub>2</sub>, los valores de la villa inicial siempre estuvieron por debajo de 460 ppm en ambas habitaciones. Si bien las rutinas de ventilación y la ocupación de los habitantes no han variado desde el estado inicial con respecto al estado reformado, se produce un aumento de concentración de CO<sub>2</sub> en el aire tras la reforma debido al alto nivel de aislamiento, que reduce en un 86% las infiltraciones de aire. Los valores máximos de concentración de CO<sub>2</sub> alcanzan 900-1000 ppm. No obstante, en un alto porcentaje de tiempo los valores de CO<sub>2</sub> están por debajo de 800 ppm, asegurando un buen nivel de calidad de aire interior, según la Norma **CEN EN 16798-1**, debido al aporte de los colectores *SolarVenti*, que introducen una gran cantidad de aire exterior garantizando un alto nivel de ventilación.

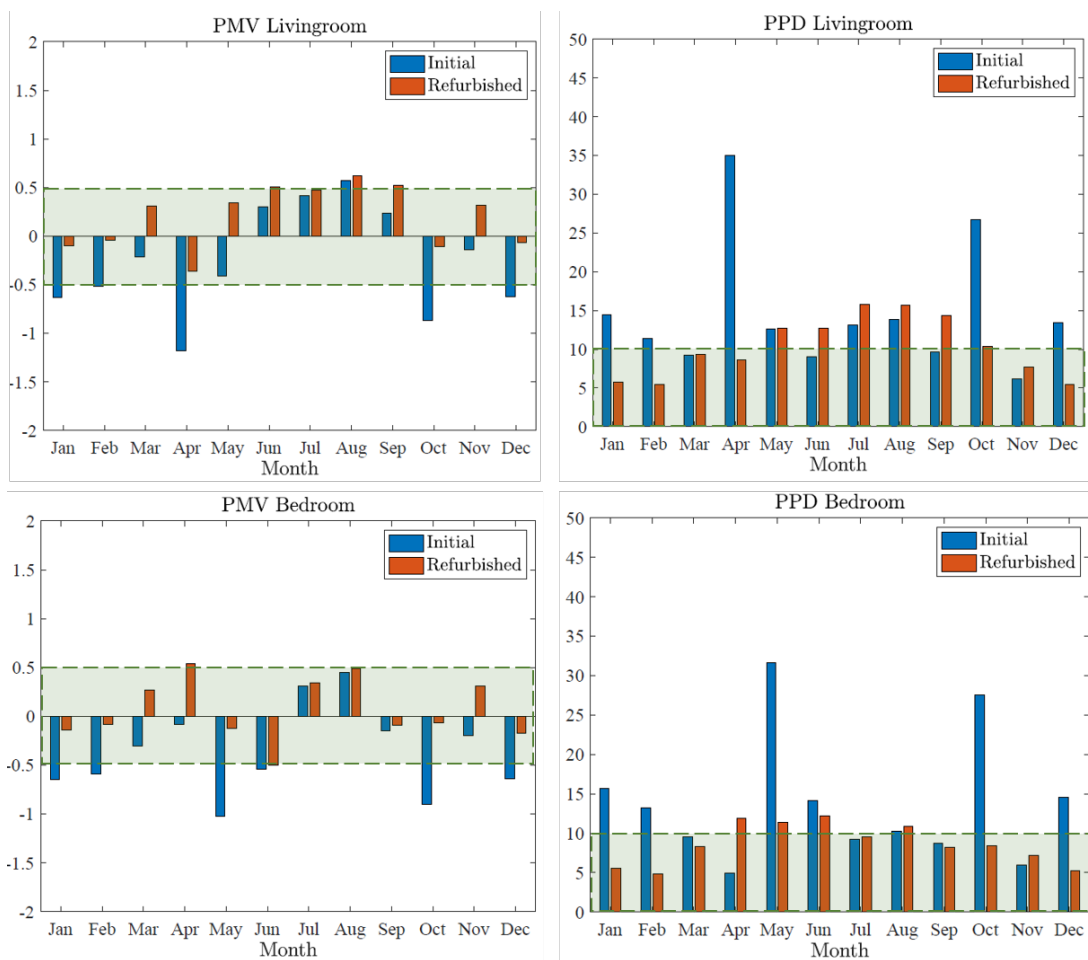


Fig. 4.13. Porcentaje de horas en confort en el salón y dormitorio principal de la villa inicial y la villa renovada para la temporada de invierno y verano.



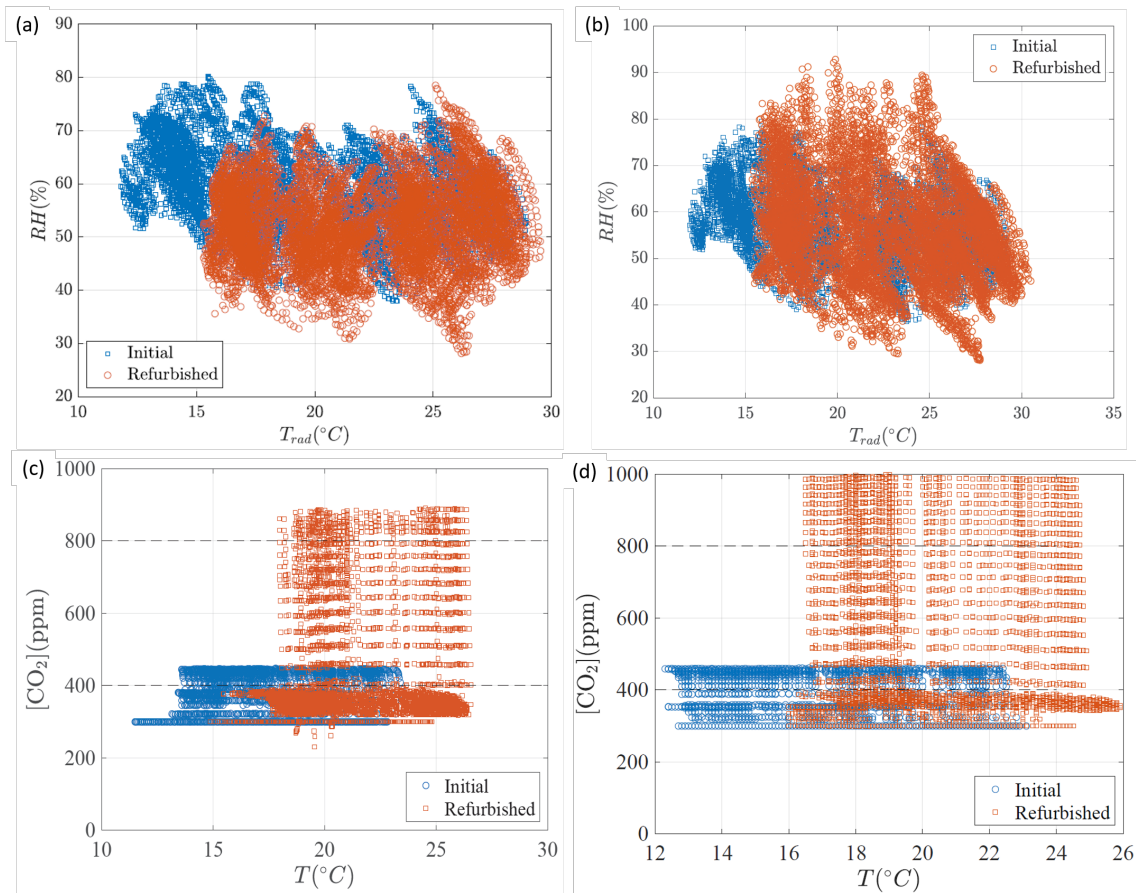


Fig. 4.14. (a) y (b): Condiciones de temperatura y humedad relativa del aire del salón y del dormitorio de la villa en su estado inicial y en su estado reformado. (c) y (d): Condiciones de temperatura y concentración de  $CO_2$  del aire en el salón y en el dormitorio para la villa en su estado inicial y en su estado reformado.

#### 4.6 Conclusiones

En esta investigación se planificó, ejecutó y se tomaron datos de un estudio completo de rehabilitación de una villa con una antigüedad cercana a un siglo en el sur de España. Se ha demostrado la viabilidad de uso de herramientas de simulación térmica junto con medidas experimentales basadas en plataforma *hardware* de código abierto de bajo coste para evaluar las medidas de ahorro energético y analizar el confort térmico y los ahorros energéticos obtenidos.

Inicialmente se estudió la villa mediante termografías y se empleó la prueba *Blower Door*, obteniéndose las actuaciones que producirían una mayor mejora de la demanda térmica del edificio. Se decidió la sustitución de las carpinterías, así como el aislado de cubiertas y cerramientos exteriores. Se utilizaron colectores solares comerciales para mejorar la ventilación en el dormitorio principal, el salón y el dormitorio. Finalmente, se incluyeron dos estufas de pellet para complementar las demandas de calefacción de la vivienda. Todas estas acciones se ejecutaron in situ. Posteriormente se fabricaron dispositivos de monitorización de temperatura y humedad realizándose una campaña de toma de datos de un mes. Esto proporcionó los datos para realizar la simulación del sistema térmico de la villa

en *EnergyPlus*, proporcionando resultados muy similares a los medidos tanto de temperatura como en humedad, sin necesidad de calibrar el modelo.

Este modelo se utilizó luego para determinar la reducción de la demanda y el ahorro en el consumo de energía entre el caso de la villa original y tras su reforma, así como la determinación de temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> en diferentes estancias como el salón y dormitorio principal. La vivienda tiene actualmente una demanda media de un 66% inferior a la casa inicial y un consumo energético de 750 kWh/mes (con una media de 9000 kWh/año), que corresponde a un 50% menor que el consumo antes de la reforma. Se ha utilizado el modelo validado de la vivienda en *EnergyPlus* para evaluar el confort térmico según la **Norma EN 16798-1**.

El principal objetivo fue la mejora de las condiciones de confort de calefacción tras la reforma. Los resultados muestran que, en temporada de calefacción, se alcanza la categoría II, con un *PMV* entre -0,5 y 0,5 y un *PPD* inferior al 10%, en el salón y el dormitorio. Sin embargo, en la temporada de refrigeración, los valores de *PMV* y *PPD* después de la renovación son ligeramente peores que los de la villa inicial, aunque el valor promedio mensual de *PMV* en el mes más caluroso es de aproximadamente 0,6. Finalmente, se ha incrementado la concentración media de CO<sub>2</sub> con respecto a la villa inicial porque se ha mejorado la estanqueidad con medidas como el aislamiento de la envolvente y la sustitución de las ventanas, pero la mayor parte del tiempo se mantiene por debajo de 800 ppm, gracias al accionamiento de los colectores de aire solares.

Este estudio demuestra en un caso práctico real que es posible planificar la rehabilitación de viviendas antiguas de forma científica, simplemente realizando medidas de infiltraciones y mediante un modelado preciso de la envolvente de la vivienda, sin necesidad de ajustar el modelo térmico. Para ello es necesario un estudio minucioso de las propiedades de todos los cerramientos de la vivienda, así como de los electrodomésticos existentes, la ocupación de los espacios interiores y la ventilación que realizan los ocupantes. Esto permite al arquitecto o ingeniero optimizar económicamente la solución a adoptar, antes de implementarla.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 5.1 Conclusiones

Esta tesis tiene como finalidad presentar una nueva forma de entender el proceso de diseño de las obras de arquitectura e ingeniería gracias a la aplicación de la Biodomótica, entendida ésta como una disciplina que permite conseguir eficiencia energética, confort y sostenibilidad edificatoria mediante el uso de materiales, técnicas y soluciones tradicionales combinadas con tecnologías contemporáneas para el uso de energías renovables, sistemas de control, automatización, y en general, aplicaciones de la era digital en la que vivimos.

Así, con el experimento realizado en el capítulo 2 se concluye que el empleo de las tecnologías de inteligencia artificial mediante redes neuronales nos permite aproximarnos de una forma automatizada y con una mayor precisión a las predicciones de confort respecto a modelos estándar habitualmente considerados como es el de Fanger o COMFA. Se obtienen resultados satisfactorios para estimar las necesidades de confort de las personas en distintos ambientes. La implementación de un mayor número de variables tales como la edad, el sexo, el IMC y un mayor número de categorías de sensación térmica mejora estas predicciones, de forma que podemos tener datos de confort muy aceptables para configurar las estrategias de diseño en los proyectos de arquitectura.

Actualmente disponemos de una amplia variedad de tecnologías de bajo coste y de alta capacidad como son las herramientas de simulación energética informática y el empleo de plataformas del tipo Arduino para controlar actuadores, sensores y sistemas de medición. Los experimentos realizados permiten concluir que estos sistemas tienen un rango de precisión cercano a los de aparatos de medición del tipo comercial, más caros y específicos para la toma de datos, por lo que, si se requieren diversas magnitudes de medición, se dependería de un mayor número de ellos. Además, los datos que se emplean para simular comportamientos térmicos de los edificios no requieren de un grado de precisión muy elevado, obteniéndose resultados precisos sin necesidad de calibración, como se comprueba en el experimento del capítulo 4. De esta forma, se obtienen datos fiables de diversos parámetros con un solo nodo sensor fabricado a medida mediante *software* libre y

plataformas económicas que nos permiten simular estrategias de diseño para las obras de arquitectura basados en la sostenibilidad.

Este mismo tipo de plataformas del tipo Arduino nos permite obtener información instantánea sobre el comportamiento higrotérmico de los edificios, la calidad de aire interior, la presencia de CO<sub>2</sub> o gas radón en el ambiente, lo que nos posibilita también adoptar medidas correctoras en los edificios construidos en sus fases de utilización y mantenimiento. Además, el uso de plataformas similares para actuar sobre los elementos constructivos e instalaciones mediante control inteligente facilita en gran medida la consecución de los objetivos globales de eficiencia energética y confort que se requieren para el diseño de viviendas de consumo energético casi nulo (*nZEB*).

La integración de estas tecnologías en el proceso constructivo y la estandarización de estos elementos incorporándolos en los edificios, aporta unos beneficios mucho mayores que el propiamente económico al mejorar el confort de los usuarios finales, por lo que la implantación de estas soluciones en las construcciones actuales es una prioridad de la sociedad en la que vivimos.

Así, toda la metodología empleada para la consecución de edificios de bajo consumo energético se puede trasladar a la rehabilitación del parque edificatorio existente, alcanzándose en estas construcciones unos niveles de eficiencia energética bastante cercanos a lo que las normativas europeas e internacionales apuntan.

Dada la mayor dificultad de predicción de los sistemas constructivos y el comportamiento de los materiales de un edificio ya construido, la simulación térmica de edificios facilita la labor de medición del comportamiento térmico del antes y del después de las intervenciones de rehabilitación energética y también permite controlar de una forma automatizada las instalaciones eficientes que pueden integrar estos proyectos.

En el experimento realizado en la rehabilitación de una vivienda, se han reducido las demandas térmicas en un 66% y los consumos en un 50%, siendo el 60% de esta energía proveniente de renovables, con la consecuente repercusión en cuanto a emisiones nocivas (CO<sub>2</sub>-eq) y mejora medioambiental en la intervención.

De todo ello se concluye que, con los criterios establecidos con la Biodomótica y las herramientas de la era digital, podemos optimizar el comportamiento de nuestros proyectos, obteniéndose mejoras en eficiencia energética, reduciendo las demandas caloríficas, los consumos, y las emisiones mediante soluciones de bajo coste económico.

## 5.2 Trabajos futuros

En este estudio se constata que el diseño de espacios arquitectónicos tiende a ser cada vez más respetuoso con el medio ambiente, comprobándose que, a día de hoy, la posibilidad de incorporar nuevas tecnologías tanto en los procesos, en la fase previa de la obra, como en la misma construcción, permite obtener unos niveles de sostenibilidad edificatoria bastante

aceptables para minimizar la problemática de la demanda energética en el proceso edificatorio.

La demanda energética de los edificios puede ser satisfecha en gran medida mediante el uso y la integración de energías renovables. La implementación de soluciones englobadas en la Biodomótica, como pueden ser el control inteligente y automatizado de estas soluciones renovables, de las instalaciones y elementos constructivos de los edificios, redundará en la eficiencia energética global, posibilitando el balance cero de energía e incluso la consecución de edificios positivos, generadores de más energía del que necesitan para su funcionamiento. La cuantificación de estas mejoras, su desarrollo en prototipos patentables y su acercamiento a los agentes del proceso edificatorio, serán motivo de investigaciones futuras.

Otro de los trabajos futuros consistirá en el desarrollo y la industrialización de sistemas Biodomóticos para su integración en viviendas prefabricadas. Esta tipología edificatoria, que cumple todos los requerimientos técnicos y normativos de una vivienda no industrializada, es considerada ante el crecimiento urbano y la superpoblación, como una de las soluciones de mayor interés ante la necesidad de construcción de viviendas y edificios respetuosos con el medio ambiente, confortables y de rápida ejecución. Por tanto, se abre una amplia línea de investigación para el estudio de la estandarización de las soluciones basadas en la Biodomótica para esta tipología de construcciones, siendo necesario profundizar en la escalabilidad de estas soluciones en cada caso debido a la complejidad del proceso edificatorio.

La justificación de su implementación, viabilidad en cuanto a costes, retornos y beneficios, así como otros factores como son la huella de carbono y el ciclo de vida, serán estudios primordiales para caminar hacia una sostenibilidad edificatoria acorde a las exigencias medioambientales actuales.



# REFERENCIAS

Adiono, T., Fathany, M.Y., Fuada, S., Purwanda, I.G., and Anindya, S.F. (2018), “A portable node of humidity and temperature sensor for indoor environment monitoring” 3rd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid, pp. 1–5.

Agathokleous R., Barone G., Buonomano A., Forzano C., Kalogirou S.A., Palombo A. (2019), “Building façade integrated solar thermal collectors for air heating: experimentation, modelling and applications”. *Applied Energy*, 239, 658-679.

Aguilera J. J., Kazanci O. B., Toftum J. (2019), “Thermal adaptation in occupant-driven HVAC control”. *Journal of Building Engineering*, 25, 100846.

Akram, S. A., Zanzinger, Z., Debose, D., Stephens, B. (2016), “Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection”, *Building and Environment*, 100, 114-126.

Ali, A.S., Zanzinger, Z., Debose, D., and Stephens, B., (2016), “Open-source building science sensors (osbss): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection”, *Building and Environment*, vol. 100, no. 1, pp. 114–126, 2016.

Almási, A.D., Wozniak, S., Cristea, V., Leblebici, Y., Engbersen, T. (2016). “Review of advances in neural networks: Neural design technology stack”. *Neurocomputing* 174, 31-41.

Amato, A., Calienno, R., and Dario, R. (2019), “Radon project: an innovative system to manage gas radon in civil buildings”, II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (Metro Ind 4.0& IoT), 207–212.

ANSI/ASHRAE Standard 55 (2017). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*; American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA.

Aparicio, P., Salmerón J.M., Ruiz, A., Sánchez F.J., Brotas L. (2016), “The globe thermometer in comfort and environmental studies in buildings”. *Revista de la Construcción*, 15(3):57-66.

Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., Mauro, G. M., Napolitano, D. F., Ruggiano, A., Viscido, L. (2020). “A real industrial building: Modeling, calibration and Pareto optimization of energy retrofit”. *Journal of Building Engineering*, 29, 101186.

Ascione, F., De Masi, R. F., De Rossi, F., Ruggiero, S., Vanoli, G. P. (2016). "Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case of study". *Applied Energy*, 183, 938-957.

Asif, A., Zeeshan, M., Jahanzaib M. (2018). "Indoor temperature, relative humidity and CO2 levels assessment in academic buildings with different heating, ventilation and air-conditioning systems". *Building and Environment*, 133, 83-90.

Asumadu-Sakyi, B. (2019), "Determination of the association between indoor and outdoor temperature in selected houses and its application: a pilot study". *Advances in Building Energy Research*, 15 (5) 1-35. doi:10.1080/17512549.2019.1606732

Atanasiu, B., Maio, J., Staniaszek, D., Kouloumpi, I., Kenkmann, T. (2016). "Overview of the EU-27 Building Policies and Programs. Factsheets on the Nine Entranze Target Countries. Cross-analysis on Member-States' Plans to Develop Their Building Regulations Towards the nZEB Standard.", ENTRANZE Project.

Attia, S. (2017) "Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE", *QScience Connect, Shaping Qatar's Sustainable Built Environment – 2* 2017:6. <http://dx.doi.org/10.5339/connect.2017.qgbc.6>

Aucapiña, G., Llanes, R., "Implementation of a radon gas monitoring network through a network of internet". PhD thesis, 2016. Universidad de Cuenca. Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

Baubiologie Maes / Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN (2015). Norma técnica de medición en baubiologie. SBM-2015. Recuperado a fecha julio del 2021 en: [https://www.baubiologie.es/wpcontent/uploads/2019/08/SBMnorma\\_2015\\_ESrev0619.pdf](https://www.baubiologie.es/wpcontent/uploads/2019/08/SBMnorma_2015_ESrev0619.pdf)

Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Fanciulli C., Ghellere M., Guazzi G., Meroni I., Salamone F., Scamoni F., Scrosati C. (2019). "A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions". *Journal of Building Engineering*, 25, 100772.

Blanco P., Fernández-Serantes L., Otero Pazos A., Calvo-Rolle J., and De Cos Juez F. (2017). "Radon mitigation approach in a laboratory measurement room". *Sensors*, vol. 17, p. 1090, 05, 2017, doi.org/10.3390/s17051090

Blázquez, T., Suárez, R., Sendra, J. J. (2015). "Towards a calibration of building energy models: A case study from the Spanish housing stock in the Mediterranean climate". *Informes de la Construcción*, 67(540): e128, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.081>.



Branco, P.T.B.S., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G., Sousa, S.I.V. (2015). “Children’s exposure to indoor air in urban nurseries-part I: CO<sub>2</sub> and comfort assessment”. *Environmental Research*, 140 (7), 1–9.

Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D. (2017). “Environmental and cost performance of building’s envelope insulation materials to reduce energy demand: Thickness optimisation”. *Energy and Buildings*, 150, 527-545.

BREEAM, Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology (2021), recuperado en: <https://breeam.es>

Brown, R., Gillespie, T. (1986). “Estimating outdoor thermal comfort using a cylindrical radiation thermometer and an energy Budget model”. *International Journal on Biometeorology*, 30, 1986, 43-52.

Burger, G., Bach, P., Ulrich, C., Leonhardt, G., Kleidorfer, M., Rauch, W. (2016). “Designing and implementing a multi-core capable integrated urban drainage modelling toolkit: lessons from citydrain3”. *Advances in Engineering Software*, 100, 277-289.

Candanedo, L.M., Feldheim, V., deramaix, D. (2018). “Reconstruction of the indoor temperature dataset of a house using data driven models for performance evaluation”. *Building and Environment*, 138 (6) 250–261, 2018. doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.035

Cao, W., Wang, X., Ming, Z., Gao, J. (2018). “A review on neural networks with random weights”. *Neurocomputing*, 275, 278-287.

Castilla, M., Álvarez, J., Ortega, M., Arahál, M. (2013). “Neural network and polynomial approximated thermal comfort models for HVAC systems”. *Building and environment* 59, 107-115.

CEN EN Standard 16798-1. Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics- Module M1-6; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2019.

CEN EN Standard 16798-2. Energy Performance of Buildings—Ventilation for Buildings—Part. 2: Interpretation of the Requirements in EN 16798-1—Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment—Module M1-6; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2019.

Chao C., Han F., Mahkamov K., Wei S., Ma X., Ling H., Zhao C. (2020). “Numerical and experimental study of laboratory and full-scale prototypes of the novel solar multi-surface air collector with double-receiver tubes integrated into a greenhouse heating system”. *Solar Energy* 202, 86-103.

Climate Consultant (Software). Recuperado en: <https://ledsgp.org/resource/climate-consultant/>

Código Técnico de la Edificación [CTE] (2019). CTE DB-HS 6., “Protección contra la exposición al Radón”.

Consejo. Recomendación del Consejo de 12 de julio de 1999 relativa a la exposición del público en general a campos electromagnéticos (o Hz a 300 GHz) (1999/519/CE). 1999, 59-67

D’Agostino D. (2015) “Assessment of the progress towards the establishment of definitions of Nearly Zero Energy Buildings (nZEBs) in European Member States”. *Journal of Building Engineering* 1, 20-32.

D’Agostino, D., De Rossi, F., Marigliano, M., Marino, C., Minichiello, F. (2019). “Evaluation of the optimal thermal insulation thickness for an office building in different climates by means of the basic and modified “cost-optimal” methodology”. *Journal of Building Engineering*, 24, 100743.

D’Ambrosio, A., Francesca, R., Olesen, B. W., Palella, B. I. , Riccio, G. (2014). “Thermal comfort: Design and assessment for energy saving”. *Energy and Buildings*, 81, 326-336.

Deng S. (2019). “Seasonal variations of indoor air quality and thermal conditions and their correlations in 220 classrooms in the midwestern united states”. *Building and Environment*, 157 (6), 79–88.

Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 19 de Mayo del 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios, Diario Oficial de la Unión europea, núm. 153, de 18 de Junio de 2010, páginas 13 a 35.

Directiva 2013/59/EURATOM DEL CONSEJO de 5 de diciembre de 2013 por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, Diario Oficial de la Unión europea, 2013.

Directiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de Mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. Diario Oficial de la unión Europea, núm. 156, de 19 de Junio de 2018, páginas 75 a 91.

Directiva 2018/2002/UE de 11 de diciembre de 2018 por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. Diario Oficial de la unión Europea, núm. 328, de 21 de diciembre de 2018, páginas 210 a 230.

Directiva 2018/2001/UE de 11 de diciembre de 2018 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. Diario Oficial de la unión Europea, núm. 328, de 21 de diciembre de 2018, páginas 82 a 209.

Du H., Huang P., Jones P. (2019). “Modular façade retrofit with renewable energy technologies: The definition and current status in Europe”. *Energy and Buildings*, 205 109543.

Du, Y., Mak, C., Ai, Z. (2018). “Modelling of pedestrian level wind environment on a high-quality mesh: A case study for the hkpolyu campus”. *Environmental Modelling and Software* 103, 105-119.

Elmehdi, H.M., Dalah, E.Z., and Bakhronov, K.(2019). “Measurements of radon concentration in water in the united arab emirates and the associated health effects”. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences*, pp. 1–5.

Ellis P.G. (2003). “Development And Validation Of The Unvented Trombe Wall Model In Energyplus”. Thesis, University of Illinois at Urbana Champaign. 2003.

EnergyPlus, 2020, U.S. Department of Energy’s (DOE). Recuperado en: <https://energyplus.net/>

Fanger, P. (1967). “Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic comfort equation”. *ASHRAE Transactions*, 73, 1-20.

Feng, H., Hewage, K. (2014). “Energy saving performance of green vegetation on LEED certified buildings”. *Energy and Buildings*, 75, 281-289.

Ferdoush, S. and Li, X. (2014). “Wireless sensor network system design using raspberry pi and Arduino for environmental monitoring applications”. *Procedia Computer Science*, vol. 34, pp. 103–110, 2014, doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.059

Ferreira, P., Ruano, A., Silva, S., Conceicao, E. (2012). “Neural networks based predictive control for thermal comfort and energy savings in public buildings”. *Energy and Buildings*, 55, 238-251.

Franco, L., Elizondo, D., Jerez, J. (2010). “Constructive neural networks”. Springer, Berlin, Germany. ISBN 978-3-642-04512-7

Frean, M. (1990) “The upstart algorithm: a method for constructing and training feedforward neural networks”. *Neural Computation* 2 (2), 198-209.

Fu, M., Weng, W., Chen, W., Luo, N. (2016). “Review on modelling heat transfer and thermoregulatory responses in human body”. *Journal of Thermal Biology*, 62, 189-200.

Garnier, A., Eynard, J., Caussanel, M., Grieu, S. (2015). “Predictive control of multizone heating, ventilation and air-conditioning systems in non-residential buildings”. *Applied Soft Computing Journal* 37, 847-862.

Gasparese, G. (2013). “Development of a low-cost system for temperature monitoring”. 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). 2013, pp. 340-343, doi: 10.1109/TSP.2013.6613948.

Ghoreishi-Karimi K., Casado-López G. (2006). “Simbiosis entre la automatización y la arquitectura bioclimática”. *Revista Infodomus* 4, 121-128. ISSN 1699-2520

Gómez, I., Franco, L., Jerez, J. (2009). “Neural network architecture selection: Can function complexity help?”. *Neural Processing Letters*, 30, 71-87.

Griffin, R., Kochermin, A., Tarr, N.G., McIntosh, H., Ding, H., Weber, J., Falcomer, R. (2011). “Sensitive, fast-responding passive electrostatic radon monitor”. *Sensors*, pp. 1074–1077. doi: 10.1109/ICSENS.2011.6127315.

Guerra-Santin, O. and Tweed, C.A. (2015). “In-use monitoring of buildings: An overview of data collection methods”. *Energy and Buildings*, 93, 189-207.

Han, K., Zhang, J. (2020). “Energy-saving building system integration with a smart and low-cost sensing/control network for sustainable and healthy living environments: Demonstration case study”. *Energy and Buildings*, 214, 109861.

Harkous F., Fardoun F., Biwole P.H. (2019). “Optimal design of renewable energy solution sets for net zero energy buildings”. *Energy*, 179, 1155-1175.

Haykin, S. (1998). “Neural Networks: A Comprehensive Foundation”, 2nd edn, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA. ISBN 81-7808-300-0

He, C., Korposh, S., Hernandez, F.U., Liu, L., Correia, R., Hayes-Gil, B.R., and Morgan, S.P. (2020). “Real-time humidity measurement during sports activity using optical fibre sensing”. *Sensors*, 20 (7), 1904–1916.

Hempel, S. (2018). “Uncertainty in the measurement of indoor temperature and humidity in naturally ventilated dairy buildings as influenced by measurement technique and data variability”. *Biosystems engineering*, 166 (2), 58–75.

Hu J., Zhang G. (2019). “Performance improvement of solar air collector based on airflow reorganization: A review”. *Applied Thermal Engineering*, 155, 592-611.

I. E. D. 6609, “A citizen’s guide to radon. the guide to protecting yourself and your family from radon” Environmental Protection Agency (EPA) 402/K-12/002, 2012.

ISO, ISO Standard 7730. Ergonomics of the Thermal Environment—Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2005.

ISO, ISO Standard 9972. 2. Thermal performance of buildings - determination of air permeability of buildings - fan pressurization method. Geneva: International Organization for Standardization; Geneva, Switzerland, 2005.

Jianga, C., Masooda, M.K., Soha, Y.C., and Li, H. (2016). “Indoor occupancy estimation from carbon dioxide concentration”. *Energy and Buildings*, 131, 132–141. 2016, doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.002

Kalhor, K., Ememinejad, N. (2020). “Qualitative and quantitative optimization of thermal insulation materials: Insights from the market and energy codes”. *Journal of Building Engineering*, 30, 101275.

Karami, M., McMorrow, G.V., Wang, L. (2018). “Continuous monitoring of indoor environmental quality using an Arduino-based data acquisition system”. *Journal of Building Engineering*, 19, 412-419.

Kaunelien, V., Prasauskas, T., Krugly, E., Stasiulaitien, I., Ciuzas, D., Seduiky, L., Martuzevi, D. (2016). “Indoor air quality in low energy residential buildings in Lithuania”. *Building and Environment*, 108, 63-72.

Kenny, N., Warland, J., Brown, R., Gillespie, T. (2009). “Part a: Assessing the performance of the COMFA outdoor thermal comfort model on subjects performing physical activity”. *International Journal of Biometeorology*, 53(5), 415-428.

Kenny, N., Warland, J., Brown, R., Gillespie, T. (2009). “Part b: Assessing the performance of the COMFA outdoor thermal comfort model on subjects performing physical activity”. *International Journal of Biometeorology*, 53(5), 429-441.

Khanmirza, E., Esmailzadeh, A., Markazi, A. (2016). “Predictive of a building hybrid heating system for energy cost reduction”. *Applied Software Computing Journal*, 46, 407-423.

Kusiak, J., Sztangret, Ą., Pietrzyk, M. (2015). "Effective strategies of metamodelling of industrial metallurgical processes". *Advances in Engineering Software*, 89, 90-97.

Las-Heras-Casas, J., Lopez-Ochoa, L. M., Paredes-Sanchez, J. P., Lopez-Gonzalez, L. M. (2018), "Implementation of biomass boilers for heating and domestic hot water in multi-family buildings in Spain: Energy, environmental, and economic assessment". *Journal of Cleaner Production*, 176, 590-603.

Lamonaca, F., Nastro, V., Nastro, A., and Grimaldi, D. (2014). "Monitoring of indoor radon pollution". *Measurement*, vol. 47, pp. 228 – 233, 2014, doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.058

Lapshina, P.D., Kurilova, S.P., and Belitsky, A.A. (2019). "Development of an arduino-based CO2 monitoring device". *Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*, 595–597.

LEED, Leadership in Energy and Environmental Design, U.S. Green Building Council, 2021, recuperado en: <https://www.usgbc.org/leed>

Lian, K.Y., Sung-Jung, H., and Wen-Tsai, S. (2013). "Intelligent multisensory control system based on innovative technology integration via ZigBee and WiFi networks". *Journal of Network and Computer Applications*, Volume 36, Issue 2, March 2013, Pages 756-767

Lindberg, F., Grimmond, C., Gabey, A., Huang, B., Kent, C., Sun, T., Theeuwes, N., Järvi, L., Ward, H., Capel-Timms, I., Chang, Y., Jonsson, P., Krave, N., Liu, D., Meyer, D., Olofson, K.F.G., Tan, J., Wästberg, D., Xue, L., Zhang, Z. (2018). "Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services". *Environmental Modelling & Software*, 99, 70-87.

Lopez Vargas, A., Fuentes, M., and Vivar, M. (2019). "IoT application for real-time monitoring of solar home systems based on Arduino with 3G connectivity", *IEEE sensors journal*, vol. 19, no. 2, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2018.2876635

Machorro-Cano, I., Alor-Hernández, G., Paredes-Valverde, M.A., Rodríguez-Mazahua, L., Sánchez-Cervantes, J.L., Olmedo-Aguirre, J.O. (2020) "HEMS-IoT: A Big Data and Machine Learning-Based Smart Home System for Energy Saving". *Energies* 2020, 13, 1097; doi:10.3390/en13051097

Madsen, L., Gram-Hanssen, K. (2017). "Understanding comfort and senses in social practice theory: insights from a danish field study". *Energy Research and Social Science* 29, 86-94.

Mehrotra, K., Mohan, C.K., Ranka, S. (1997). "Elements of Artificial Neural Networks". MIT Press, Cambridge, MA, USA (1997) ISBN 0-262-13328-8

Michael, K., Garcia-Souto, M., Dabnichki, P. (2017) “An investigation of the suitability of artificial neural networks for the prediction of core and local skin temperatures when trained with a large and gender-balanced database”. *Applied Soft Computing Journal*, 50, 327-343.

Miqdad, A., Kadir, K., and Ahmed, S.F. (2017). “Development of data acquisition system for temperature and humidity monitoring scheme”. *4th International Conference on Smart Instrumentation*. *Measurement and Application*, pp. 1–4, 2017. doi:10.1109/icsima.2017.8311992

Moniruzzaman, MD., Khezzr, S., Yassine A., Benlamri, R. (2020). "Blockchain for smart homes: Review of current trends and research challenges"; *Computers and Electrical Engineering* 83 (2020) 106585. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106585>

Molnár, J., Lorinc, T., and Slavko, O. (2019). “Design and Implementation of an intelligent Air Quality Sensor”. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2019, pp. 74-77, doi: 10.1109/MEES.2019.8896527.

Moreno-Sáez, R., Mora-López, L. (2014) “Modelling the distribution of solar spectral irradiance using data mining techniques”. *Environmental Modelling and Software*, 53, 163-172.

Müller, N., Kuttler, W., Barlag, A.B. (2015). “Counteracting urban climate change: Adaptation measures and their effect on thermal comfort”. *Theoretical and Applied Climatology*, 115 (1-2), 243-257.

Murthy, M.N. and AjaySaiKiran, P. (2018). “A smart office automation system using raspberry pi (model-b)”. *International Conference on Current Trends towards Converging*, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/ICCTCT.2018.8550894

Mylonas, A., Kazanci, O. B., Andersen, R. K., and Olesen, B. W. (2019). “Capabilities and limitations of wireless CO<sub>2</sub>, temperature and relative humidity sensors”. *Building and Environment*, 154 (5), 362– 374.

Neila González, F.J. (2014). “Arquitectura Bioclimática, en un entorno sostenible” Madrid. Ed. Munilla-Lería, ISBN-84-89150-64-8.

Nielsen, T.R., Drivsholm, C. (2010). “Energy efficient demand-controlled ventilation in single family houses”. *Energy and Buildings*, 42 (11), 1995–1998. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.06.006

Olesen, B., Parsons, K. (2002). “Introduction on thermal comfort standards and to the proposed new versión of en ISO 7730”. *Energy and Buildings*, 34(6), 537-548.



Orosa, J., Costa, A., Rodríguez-Fernández, A., Roshan, G. (2014). "Effect of climate change on outdoor thermal comfort in humid climates". *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12, 46 (2014). <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-46>

Ortega-Zamorano, F., Jerez, J., Subirats, J., Molina, I., Franco, L. (2014). "Smart sensor actuator node reprogramming in changing environments using a neural network model". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 30, 179-188.

Özbalta, T. G. and Kartal, S. (2010). "Heat gain through Trombe wall using solar energy in a cold region of Turkey". *Scientific Research and Essays*, 5, 2768-2778.

Paredes-Valverde, M.A., Alor-Hernández, G., García-Alcaráz, J.L., Salas-Zárate, M., Colombo-Mendoza, L., Sánchez-Cervantes, J.L. (2019) "IntelliHome: An internet of things-based system for electrical energy saving in smart home environment". *Computational Intelligence*. 2019;1-22; doi: 10.1111/coin.12252

PHI, Passive House institute, 2021. Recuperado en: <https://passivehouse.com>

Pilliza, G., Roman, O., Morejon, W., Hidalgo, S., Ortega-Zamorano, F. (2018). "Risk analysis of the stock market by means self-organizing maps model". 2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ETCM.2018.8580320.

Pokorny, J., Fiser, J., Jicha, M. (2014). "Virtual testing stand for evaluation of a car cabin indoor environment". *Advances in Engineering Software*, 76, 48-55.

Potgieter, M.S.W., Bester, C.R., Bhamjee, M. (2020). "Experimental and CFD investigation of a hybrid solar air heater". *Solar Energy*, 195, 413-428.

Pulido, B., Zamarreño, J., Merino, A., Bregon, A. (2019). "State space neural networks and model-decomposition methods for fault diagnosis of complex industrial systems". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 79, 67-86.

Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. Boletín Oficial del Estado núm. 71, Madrid, 24 de marzo de 2021, páginas 33748 a 33793.

Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas, Recomendación 1999/519/CE del Consejo, de 12 de julio de 1999, Boletín Oficial del estado, núm. 234, Madrid 29/09/2001.



Reed, R.D., Marks, R.J. (1998). "Neural Smithing: "Supervised Learning in Feedforward Artificial Neural Networks". MIT Press, Cambridge, MA, USA (1998). ISBN: 9780262527019

Rodríguez-Alabarce, J., Ortega-Zamorano, F., Jerez, J.M., Ghoreishi, K., Franco, L. (2016). "Thermal comfort estimation using a neurocomputational model". IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI), 1-5.

Ruiz, M.C., Romero, E. (2011). "Energy saving in the conventional design of a Spanish house using thermal simulation". Energy and Buildings, 43, 3226-3235.

Sangkertadi, S., Syafriny, R. (2014). "New equation for estimating outdoor thermal comfort in humid-tropical environment". European Journal of Sustainable Development 3, 43-52.

Sarhan, Q.I. (2020). "Systematic survey on smart home safety and security systems using the Arduino platform". IEEE Access, 8, 128362– 128384.

Soto Barrionuevo, A., "Análisis de estrategias bioclimáticas aplicadas a edificaciones nZEB" Revista Doctorado UMH, vol. 4,no. 2, p4, 2018 [Online]

Subirats, J., Franco, L., Jerez, J. (2012). "C-mantec: A novel constructive neural network algorithm incorporating competition between neurons". Neural Networks 26, 130-140.

Sun, Z., Wang, S., and Ma, Z. (2011). "In-situ implementation and validation of a CO2-based adaptive demand-controlled ventilation strategy in a multizone office building". Building and Environment, 46 (1), 124– 133. 2011. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.06.006

Szczurek, A., Maciejewska, M., and Pietrucha, T. (2017). "Occupancy determination based on time series of CO2 concentration, temperature and relative humidity". Energy and Buildings,147,142–154. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.080>

Tan, Y. and Xiao, D. (2011). "Revision for measuring the radon exhalation rate from the medium surface". IEEE Transactions on Nuclear Science, 58 (1), 209–213.

Uriarte, A., Garai, I., Ferdinando, A., Erkoreka, A., Nicolas, O., Barreiro, E. (2019). "Vacuum insulation panels in construction solutions for energy efficient retrofitting of buildings. Two case studies in Spain and Sweden". Energy and Buildings, 197, 131-139.

VERDE. Green Building Council España (GBCe), 2021, recuperado en: <https://gbce.es/certificacion-verde>.

Vidal Prado, A. and Pindado, A. (2018). "Design and development of a 5-channel Arduino-based data acquisition system (ABDAS) for experimental aerodynamics research" Sensors, vol. 18, no. 7, pp. 2382–, 2018, doi.org/10.3390/s18072382

Wang, L.H.B., Tian, J. and Yao, Y. (2018). “High sensitivity humidity fiberoptic sensor based on all-agar fabry–perot interferometer”. *IEEE Sensors Journal*, 18 (12), 4879–48850.

WHO (2015). “Manual on indoor radon. A public health perspective”, World Health Organization.

Yang, Z., Li, N., Beceri K-Gerber, B., Orosz, M. (2012). “A multi-sensor based occupancy estimation model for supporting demand driven hvac operations”. *Proceedings of the 2012 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, no. 2, 2012.

Yu, T., Liu, B., Lei, B., Yuan, Y., Bi, H., and Zhang Z. (2019). “Thermal performance of a heating system combining solar air collector with hollow ventilated interior wall in residential buildings on Tibetan plateau”. *Energy*, 182, pp. 93–109, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.047>

Zhai, X.Q., Song, Z.P., Wang, R.Z. (2011). "A review for the applications of solar chimneys in buildings". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 3757–3767. doi:10.1016/j.rser.2011.07.013

Zehnder Group Ibérica Indoor Climate, S.A.U., recuperado el 19 septiembre del 2021 en: <https://www.zehnder.es/productos-y-sistemas/ventilacion-de-confort>.