Universidad de Huelva

Departamento de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática



Contribuciones desde la arquitectura y la ingeniería a los edificios de energía mínima

Memoria para optar al grado de doctor
presentada por:

Sergio Jesús Gómez Melgar

Fecha de lectura: 22 de septiembre de 2017

Bajo la dirección de los doctores:

José Manuel Andújar Márquez

Miguel Ángel Martínez Bohórquez

Huelva, 2017





Contribuciones desde la Arquitectura y la Ingeniería a los edificios de energía mínima

TESIS DOCTORAL

Mayo 2017

Autor: Sergio J. Gómez Melgar

Directores: Dr. José Manuel Andújar Márquez
Dr. Miguel Ángel Martínez Bohórquez

Universidad de Huelva

Contribuciones desde la Arquitectura y la Ingeniería a los edificios de energía mínima

TESIS DOCTORAL

Mayo 2017

Autor: Sergio J. Gómez Melgar

Directores: Dr. José Manuel Andújar Márquez
Dr. Miguel Ángel Martínez Bohórquez



Universidad de Huelva

D. José Manuel Andújar Márquez, Catedrático de Universidad de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva,

D. Miguel Ángel Martínez Bohórquez, Profesor Titular de Universidad de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva,

CERTIFICAN:

Que D. Sergio J. Gómez Melgar, Arquitecto, ha realizado bajo nuestra dirección y dentro del programa de doctorado *Ingeniería de control, sistemas electrónicos e informática industrial*, el trabajo de investigación correspondiente a su Tesis Doctoral titulado:

Contribuciones desde la Arquitectura y la Ingeniería a los edificios de energía mínima

Revisado el presente trabajo, estimo que puede ser presentado al Tribunal que ha de juzgarlo.

Y para que así conste a efectos de lo establecido en el Real Decreto 99/2011 y por la normativa Reguladora del título de Doctor de la Universidad de Huelva, autorizo la presentación de este trabajo en la Universidad de Huelva.

Huelva, a 30 de Mayo de 2017

Director: Dr. José Manuel Andújar Márquez

Director: Dr. Miguel Ángel Martínez Bohórquez

Doctorando: D. Sergio J. Gómez Melgar

Agradecimientos:

A José Manuel Andújar, director de este trabajo, mi maestro y mi mentor; por acompañarme en esta nueva aventura para mi, y estar siempre dispuesto a complicarte la vida conmigo, recorriendo caminos nuevos del conocimiento.

A Miguel Ángel Bohórquez, codirector de este trabajo y *mago* de la electrónica.

A mis compañeros investigadores del Grupo de Investigación TEP192 *Control y Robótica*, por acogerme en su seno y dar soporte científico a esta investigación.

A mis compañeros profesores del Departamento de *Ingeniería Minera, Mecánica, Energética y de la Construcción*, por permitirme desarrollar mi docencia año tras año. Y ya van trece.

A María José y Henar, mis socias en *LAR Arquitectura*, por acompañarme en esta aventura de realizar una arquitectura responsable, sostenible y eficiente.

…connecting dots…

SJ

Dedicatorias:

A Paloma, por tu presencia en mi vida. Por corregirme, por completarme, por amarme.

A mis hijas María, Clara y Paloma, por hacerme mejor persona.

A mis padres Pedro y Concha, por darme la vida.

A Juan Diego, David y Juan, por vuestro ánimo, disponibilidad y valiosos consejos.

A Fernando, Elena e Isaac, por confiarme vuestras casas para experimentar.

A Francisco y José María, por ejecutar con diligencia las instrucciones de un director de obra poco convencional.

Your time is limited, so don't waste it living someone else's life. Don't be trapped by dogma, which is living with the results of other people's thinking. Don't let the noise of other's opinions drown out your own inner voice. And most important, have the courage to follow your heart and intuition. They somehow already know what you truly want to become. Everything else is secondary.

SJ



Índice general

INDICE GENERAL

1. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA TESIS 1

1.1 RESUMEN DE LA TESIS 2

1.2 INNOVACIONES QUE APORTA LA TESIS 8

1.3 RENDIMIENTO CIENTÍFICO DE LA TESIS 10

1.3.1 Proyecto de investigación 10

1.3.2 Producción científica por capítulos 10

1.3.2.1 Capítulo 3: Cálculo de la difusividad térmica del terreno mediante la medida directa de su temperatura. 10

1.3.2.2 Capítulo 4: Medida simple, rápida y de bajo coste de la transmitancia térmica en la edificación 11

1.3.2.3 Capítulo 5: uhuMEB: Metodología de diseño, construcción y operación de edificios de consumo de energía mínimo en clima subtropical. 11

1.3.2.4 Capítulo 6: Rehabilitación energética a escala territorial. 11

1.3.3 Estancias de investigación 12

1.3.3.1 Universidade do Algarve 12

1.3.3.2 Nanjing University 12

1.4 TRANSFERENCIA DE LOS RESULTADOS DE LA TESIS 13

1.4.1 Transferencia científica por proyectos 13

1.4.1.1 Aulario Isidoro Morales 16

1.4.1.2 Guardería Jardín de Luz 16

1.4.1.3 Colegio Salesiano Cristo Sacerdote 17

1.4.1.4 Albergue Municipal de Huelva 17

1.4.1.5 Casa Zaranda 18

1.4.1.6 Casa de los maestros 19

1.4.1.7 Centro Ernest Lluch 19

1.4.1.8 Casas de El Carmen 20

1.4.1.9 Frater Huelva 20

1.4.1.10 Casa de Cáritas 21

1.4.1.11 Centro de Respiro Familiar 22

1.4.1.12 Casa NOAH 22

1.4.1.13 La Casita 23

1.4.1.14 Ciudad del Marisco 23

1.4.1.15 Centro de Salud Isla Chica 24

1.4.1.16 CEIP Ensanche Sur 24

1.4.1.17 Piscina cubierta y Gimnasio 25

1.4.1.18 Casa Rosal 25

1.4.2 Transferencia científica por colaboraciones con universidades y empresas internacionales 26
1.4.2.1 Transferencia científica por colaboración con universidades internacionales 26
1.4.2.2 Transferencia científica por colaboración con empresas internacionales 27

2. INTRODUCCIÓN A LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS 31

2.1 INTRODUCCIÓN 32

2.2 MARCO NORMATIVO ACTUAL 34
2.2.1 Normativa estatal 34
2.2.2 Normativa UE 35

2.3 LOS SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN VOLUNTARIOS 38
2.3.1 Passivhaus 38
2.3.2 LEED 40
2.3.3 BREEAM 43
2.3.4 3-STAR GBEL 44
2.3.5 Otras certificaciones voluntarias 46
2.3.5.1 German Sustainable Building Council (DGNB) 46
2.3.5.2 Haute Qualité Environnementale (HQE) 46
2.3.6 Resumen de los sistemas de certificación voluntarios 46

2.4 EDIFICIOS DE CONSUMO DE ENERGÍA MÍNIMA 47

2.5 CONCLUSIONES 49

3. CÁLCULO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA DEL TERRENO MEDIANTE LA MEDIDA DIRECTA DE SU TEMPERATURA. APLICACIÓN A LOS SISTEMAS DE GEOTERMIA DE MUY BAJA ENTALPÍA 54

3.1 INTRODUCTION 55

3.2 THEORETICAL FOUNDATION 56

3.3. DEVELOPED INSTRUMENTATION SYSTEM FOR MEASURING GROUND TEMPERATURE 59
3.3.1 Ground Temperature Probe 59
3.3.2 The 1-Wire Bus Master 61
3.3.3 The RS 485 Patch Panel 61
3.3.4 Microcontroller Cards 61
3.3.5 Monitoring and Control Software 61

3.4 EXPERIMENTATION AND RESULTS 63
3.4.1 Calculation of the Actual Ground Thermal Diffusivity 65

3.5 CONCLUSIONS 66

4. MEDIDA SIMPLE, RÁPIDA Y DE BAJO COSTE DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA EN LA EDIFICACIÓN 69

4.1. INTRODUCTION....69

4.2 MEASUREMENT METHODOLOGY....72

4.3 DEVELOPED U-Value METER....73

4.3.1. Master + indoor module....74

4.3.2 Indoor module....75

4.3.3 Outdoor module....76

4.3.4 User interface....76

4.4 TAKING MEASUREMENTS AND RESULTS....77

4.4.1 Results....77

4.5 DISCUSION....79

4.6 CONCLUSIONS....80

5. uhuMEB: METODOLOGÍA DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE EDIFICIOS DE CONSUMO DE ENERGÍA MÍNIMO EN CLIMA SUBTROPICAL....83

5.1 INTRODUCCIÓN....83

5.2 NEGOCIACIÓN INICIAL....87

5.2.1 Condicionantes objetivos....87

5.2.1.1 Programa....87

5.2.1.2 Presupuesto....87

5.2.1.3 Plazo....88

5.2.2 Condicionantes subjetivos....89

5.2.2.1 Emociones....89

5.2.2.2 Estética....89

5.3 DISEÑO ARQUITECTÓNICO....90

5.4 INGENIERÍA DE INSTALACIONES....90

5.5 GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN....90

5.6 MANTENIMIENTO DEL EDIFICIO....91

5.7 EXPERIMENTACIÓN....91

5.7.1 Materiales y métodos....92

5.7.2 Resultados....94

5.7.2.1 Negociación inicial....94

5.7.2.2 Diseño arquitectónico....94

5.7.2.2.1 Protección solar del edificio....96

5.7.2.2.2 Envolvente continua de transmitancia térmica mínima....96

5.7.2.2.3 Mínimo factor de forma....97

5.7.2.2.4 Envolvente estanca....97

5.7.2.2.5 Máxima ventilación natural 97
5.7.2.2.6 Máxima iluminación natural 98
5.7.2.3 Ingeniería de instalaciones....98
5.7.2.3.1 Ventilación forzada de doble flujo con recuperación de calor 98
5.7.2.3.2 Instalación de aire acondicionado de máxima eficiencia 99
5.7.2.3.3 Instalación de generación de ACS de máxima eficiencia 99
5.7.2.3.4 Electrodomésticos de máxima eficiencia....99
5.7.2.3.5 Iluminación artificial de máxima eficiencia 99
5.7.2.3.6 Geotermia de muy baja entalpía....99
5.7.2.3.7 Instalación de generación de energía renovable 100
5.7.2.3.8 Sistema de instrumentación y adquisición de datos 100
5.7.2.4 Gestión de la construcción....101
5.7.2.4.1 Termografía de la envolvente 101
5.7.2.4.2 Test de estaqueidad al aire 101
5.7.2.4.3 Control de ejecución de sistemas 102
5.7.2.5 Mantenimiento del edificio....102
5.7.2.5.1 Análisis de datos 102
5.7.2.5.2 Mantenimiento 102
5.7.2.5.3 Rehabilitación energética 102
5.7.3 Discusión....102

5.8 CONCLUSIONES 105

6. REHABILITACIÓN ENERGÉTICA A ESCALA TERRITORIAL 108

6.1 INTRODUCCIÓN 109

6.2 TRABAJO DESARROLLADO....111

6.2.1 Estudio urbano de las ocho capitales andaluzas....111
6.2.1.1 Medidas de transmitancia, radiación térmica y estanqueidad 112
6.2.2 Sistema de información geográfica 114
6.2.3 Simulaciones energéticas 116
6.2.3.1 Análisis de componentes 116
6.2.3.2 Análisis de combinaciones factibles 117
6.2.3.3 Estudios previos por capitales 118
6.2.3.4 Análisis de la reducción de la demanda 118
6.2.3.5 Análisis del presupuesto por actuación 119
6.2.3.6 Resultados por capitales 120
6.2.3.7 Resultados por tipos 120
6.2.4 Actuaciones de rehabilitación energética....121
6.2.4.1 Rehabilitación energética de la envolvente....122
6.2.4.2 Configuración de instalación eléctrica 123

6.2.4.3 Sistemas integrados de energias renovables 124
6.2.4.4 Sistemas activos de alta eficiencia 128
6.2.5 Instrumentación específica desarrollada....130
6.2.5.1 Instrumentación desarrollada 130
6.2.5.2 Datos en tiempo real 136
6.3 METODOLOGÍA, EQUIPAMIENTO EMPLEADO Y DESARROLLOS REALIZADOS 137
6.3.1 Estudio urbano de las ocho capitales andaluzas 137
6.3.1.1 Medidas de transmitancia, radiación térmica y estanqueidad 139
6.3.2 Sistema de información geográfica (SIG) 141
6.3.2.1 Selección de polígonos de crecimiento de interés 141
6.3.2.2 Implementación del SIG 142
6.3.3 Simulaciones energéticas 143
6.3.3.1 Descripción del proceso de modelado energético 144
6.3.3.1.1 Información previa 144
6.3.3.1.2 Definición del lugar de ubicación 145
6.3.3.1.3 Modelado geométrico 146
6.3.3.1.4 Definición de la envolvente térmica 146
6.3.3.1.4 Definición del uso de la vivienda 147
6.3.3.1.5 Definición de las instalaciones de iluminación 149
6.3.3.1.6 Definición de las instalaciones térmicas 149
6.3.3.1.7 Simulación energética 149
6.3.3.2 Valoración económica de las simulaciones 152
6.3.3.3 Cálculo del periodo de amortización de las actuaciones 152
6.3.4 Actuaciones de eficiencia y rehabilitación energética 152
6.3.5 Instrumentación desarrollada y procesamiento de datos 155
6.3.5.1 Canal de instrumentación de temperatura 156
6.3.5.1.1 Canal de instrumentación tipo DS18B20 156
6.3.5.1.2 Canal de instrumentación tipo DS2438 158
6.3.5.2 Canal de instrumentación de humedad 158
6.3.5.3 Canal de instrumentación de tensión y corriente 159
6.3.5.3.1 Medición de la tensión 159
6.3.5.3.2 Medición de la corriente 160
6.3.5.4 Canal de instrumentación inalámbrico de temperatura y humedad 161
6.3.5.5 Canal de instrumentación de los sistemas de energías renovables 163
6.3.5.6 Sistema de comunicaciones 163
6.4 DISCUSIÓN 165
6.4.1 Estudio urbano de las ocho capitales andaluzas 165
6.4.2 Sistema de información geográfica (SIG) 166
6.4.3 Simulaciones energéticas 167

6.4.4 Actuaciones de eficiencia y rehabilitación energética 168
6.4.5 Instrumentación desarrollada y procesamiento de datos 171
6.4.6 Producción de las instalaciones de energía renovable 174
6.4.6.1 Vivienda 4ºE 174
6.4.6.2 Vivienda 4ºF 176
6.4.7 Análisis del ahorro energético en las viviendas instrumentadas 177
6.4.7.1 Vivienda 4º E 177
6.4.7.2 Vivienda 4ºF 177
6.4.8 Caracterización de las soluciones propuestas 178
6.4.8.1 Cerramientos analizados presentes en las viviendas 178
6.4.8.2 Propuesta de soluciones a los cerramientos originales presentes en las viviendas 184
6.4.8.2.1 Soluciones propuestas al cerramiento original C1 184
6.4.8.2.2 Soluciones propuestas al cerramiento original C2 184
6.4.8.2.3 Soluciones propuestas al cerramiento original C3 184
6.4.8.2.4 Soluciones propuestas al cerramiento original C4 184
6.4.8.2.5 Soluciones propuestas al cerramiento original C5 184
6.4.8.2.6 Soluciones propuestas al cerramiento original C6 184
6.4.8.2.7 Soluciones propuestas al cerramiento original C7 184
6.4.8.2.8 Soluciones propuestas al cerramiento original C8 184
6.4.8.3 Carpinterías analizadas presentes en las viviendas 185
6.4.8.3.1 Propuesta de soluciones a las carpinterías originales presentes en las viviendas 185
6.4.8.4 Medianeras y particiones analizadas presentes en las viviendas 186
6.4.8.4.1 Solución propuesta a las particiones y medianeras originales 186
6.4.8.5 Cubiertas analizadas presentes en las viviendas 187
6.4.8.5.1 Propuesta de soluciones a las cubiertas originales presentes en las viviendas 188
6.5 PROPUESTAS DE ACTUACIÓN Y PERIODOS DE AMORTIZACIÓN 190
6.5.1 Propuestas de actuación 190
6.5.2 Periodos de amortización 190
6.6 CONCLUSIONES 191

7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS / CONCLUSIONS AND FUTURE DEVELOPMENTS 195
7.1 CONCLUSIONES / CONCLUSIONS 197
7.2 DESARROLLOS FUTUROS / FUTURE DEVELOPMENTS 211

ANEXOS 220
ANEXOS AL CAPÍTULO 6 220
6.1.1 Análisis capitales andaluzas por décadas 220

6.1.2 Fichas de crecimientos urbanos y viviendas....220
6.1.3 Medidas de transmitancias, radiación térmica y estanqueidad....220
6.3.1 Análisis de componentes....220
6.3.2 Análisis de combinaciones factibles....220
6.3.3 Estudios previos por capitales....220
6.3.4 Análisis de reducción de la demanda....220
6.3.5 Análisis del presupuesto por actuación....220
6.3.6 Resultados por capitales....220
6.3.7 Resultados por tipos....220
6.3.8 Entrada de datos de simulación....220
6.4.1 Rehabilitación energética de la envolvente....220
6.4.2 Configuración de la instalación eléctrica....220
6.4.3 Sistemas integrados de energías renovables....220
6.4.4 Sistemas activos de alta eficiencia....220
6.5.1 Instrumentación desarrollada....220
6.5.2 Datos en tiempo real....220
6.6.1 Periodos de amortización....220
6.7.1 Permisos de los propietarios para el acceso a sus viviendas....220
6.7.2 Convenios de colaboración con empresas....220
6.7.3 Facturas de consumo eléctrico en viviendas....220

REFERENCIAS....223

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS....233


Contribuciones desde la Arquitectura y la Ingeniería a los edificios de energía mínima
TESIS DOCTORAL
Capítulo 1
Planteamiento general de la tesis

1. PLANTEAMIENTO GENERAL DE LA TESIS

***Abstract**: In chapter 1 of this doctoral thesis we present an overview of the thesis, highlighting the innovations, the scientific contributions and the research transfer results carried out until the date of its deposit. In Chapter 2 of this doctoral thesis we conducted a comprehensive review of the state of the art in scientific and regulatory knowledge regarding the energy efficiency of buildings. This chapter finish with a section devoted to the MEB concept, where a proposal for the nZEB Spain's definition is provided. Chapter 3: Ground thermal diffusivity calculation by direct soil temperature measurement. Application to very low enthalpy geothermal energy systems, comes to make a contribution for the incorporation of this kind of renewable energy to MEB buildings in subtropical climate. It develops a scientific methodology for the exact calculation of the thermal diffusivity of a soil. In a simple and, over all, economic way. To do this, using the geotechnical tests compulsory in the structural safety regulations, we measure the temperature of the soil to the depth where the very low enthalpy geothermal system (VLEGE) is going to be installed. This measure, carried out by an experimental probe developed y the research team, allows the thermal diffusivity of the terrain to be calculated through an analytical development, which is the fundamental parameter for the design and dimensioning of the VLEGE. Chapter 4: Simple, quick and low-cost measurement of thermal transmittance in buildings, aims to achieve MEB buildings by improving the insulation capacity of its envelope. It develops a quick, inexpensive and easy to use measuring system that allows multiple measurements to be taken at the same time in a single building or even in adjoining buildings when it comes to the energy retrofitting of an quartier or a complete neighborhood. A system has been developed that, contrary to what is done today, does not need to measure heat diffusivity in the building envelope. It only needs to obtain temperature measurements that, using the Fourier differential equation, known in some areas such as Newton's cooling law, gives us the value of the thermal transmittance (U-Value) of the envelope. Chapter 5: uhuMEB: Methodology of design, construction and operation of minimum energy consumption buildings in subtropical climate, is making a fundamental methodological contribution for the operational integration of the different phases of development of an MEB in subtropical climate. These different phases include negotiation, architectural design, facility engineering, construction management and the operation and maintenance phase of the MEB. A key tool for the implementation of this methodology is the building information model (BIM), with a specific level of development (LOD) for each phase. At the end of the chapter, a real experimental case is shown for the step-by-step validation of the methodology. It is a detached house in a subtropical climate called Casa Zaranda. Chapter 6: Energy retrofitting at territorial level, this is a complete and self-contained research on the contributions made to energy retrofitting at neighborhood level, for the significant improvement of energy efficiency in a subtropical climate region of Andalucía. Although in Chapter 5 it was experimented with a newly built single family dwelling, which allowed to put in value the developed methodology applied to new work, this chapter 6 constitutes a second and more extensive experimental test, applied to the energetic retrofitting of social housing in the eight main cities of Andalusian region. Finally, in chapter 7 of this thesis, we summarize the main conclusions and the future developments that derive from the research work carried out, focusing in the new research lines that are opened in the field of energy efficiency in buildings.*

1.1 RESUMEN DE LA TESIS

En el capítulo 1 de este trabajo de investigación planteamos una visión general de la tesis doctoral, destacando las innovaciones, las aportaciones científicas y la transferencia de resultados de investigación llevada a cabo hasta la fecha de su depósito.

Dicho lo anterior, la naturaleza del trabajo de investigación llevado a cabo, hace pensar que en un futuro próximo los resultados de investigación que se deriven del mismo sean mucho más prolíficos que los que a día de hoy podemos mencionar. Éste ha sido un trabajo arduo y muy productivo en cuanto a aportaciones realizadas. Ahora toca, fruto de un análisis posterior y sosegado, extraer todos los resultados que permitan un elevado nivel de publicaciones en revistas de prestigio.

En el capítulo 2 de este trabajo de investigación realizamos una revisión exhaustiva sobre el estado del arte en materia de conocimiento científico y regulatorio en relación con la eficiencia energética de los edificios. La certificación de la eficiencia energética en los edificios está sujeta a diferentes reglamentaciones y paradigmas, casi siempre provenientes del sector privado. Se trata de asociaciones, fundaciones, centros de investigación, entidades, etc.; que con una visión innovadora plantean unas exigencias que con el paso del tiempo, están siendo incorporadas en lo esencial por las administraciones competentes, para terminar incorporadas en reglamentos y normas de obligado cumplimiento en cada país y región. Esto es lo que hemos dado en denominar *sistemas de certificación voluntarios:* exigencias que deciden adoptar proyectistas, promotores y constructores, para mejorar la eficiencia energética del edificio en comparación con lo que la *normativa de obligado cumplimiento* establece como mínimo aceptable. Por supuesto, es probable que estos criterios más exigentes que la propia norma, con el tiempo terminen siendo parte de ella.

En el contexto de este trabajo de investigación, centrado en el ámbito de la eficiencia energética en la edificación, hacemos referencia a muchas denominaciones al uso: desde edificios de consumo de energía casi nula (nZEB), hasta edificios de consumo de energía cero (ZEB), e incluso edificios generadores netos de energía (+ZEB). No obstante, estas fronteras conceptuales a día de hoy no están tan claras. La casuística propia de cada edificio, que está condicionada no sólo por su diseño arquitectónico, sino también por sus instalaciones y, sobre todo, por su mantenimiento y régimen de uso, hace desde nuestro punto de vista más interesante, utilizar un criterio conservador en el sentido de procurar que el edificio ofrezca a sus usuarios la mejor habitabilidad y confort con el mínimo consumo de energía requerido. Naturalmente, ésta es una frontera difusa, muy difícil de establecer con números. Por eso hemos optado por introducir en esta tesis doctoral el término *edificios de consumo de energía mínima* (MEB). Con el término MEB nos referimos a aquel edificio proyectado y construido para funcionar, desde el punto de vista energético, en perfecta armonía con el medio ambiente. El concepto de consumo mínimo hace referencia a que está optimizado desde el punto de vista de la demanda, y que ese mínimo de energía necesaria para funcionar puede, y debe provenir, de fuentes renovables (principalmente solar, eólica y geotérmica). Por tanto, bajo el acrónimo MEB se engloban, según nuestra perspectiva, los términos ya definidos de nZEB, ZEB y +ZEB.

Este capítulo termina con un apartado dedicado al concepto de MEB, donde se aporta una propuesta de definición de nZEB en España (MEB, según la nueva terminología definida en esta tesis), a la espera de que el Ministerio de Fomento trasponga la directiva 2012/27/UE [1].

A modo de conclusiones de la revisión realizada en este capítulo 2 destacamos:

1. La importancia de adaptar los requisitos regulatorios y las estrategias de diseño de MEB para el clima cálido subtropical; en el caso de una buena parte de España y la práctica totalidad de Andalucía, mediterráneo cálido.
2. La importancia de diseñar y de validar las soluciones de diseño realizadas, en base a

la instrumentación del MEB y el análisis de los datos obtenidos.
3. La importancia de integrar en el proceso de diseño del MEB, las fases de negociación con el cliente y de operación o vida útil.
4. La importancia de incorporar las energías renovables al MEB, cuidando su integración arquitectónica.
5. La importancia de la rehabilitación energética para la reducción del consumo de energía en el sector de la edificación a escala de ciudad y a escala territorial.

El capítulo 3 de este trabajo se denomina *Cálculo de la difusividad térmica del terreno mediante la medida directa de su temperatura. Aplicación a los sistemas de* g*eotermia de muy baja entalpía*. El capítulo viene a realizar una aportación para la incorporación de esta forma de energía renovable a la negociación, diseño, construcción y operación, con criterios MEB, de edificios en clima cálido subtropical. El problema que se aborda es complejo y, desde nuestro punto de vista, no resuelto a día de hoy. El dimensionado adecuado de una instalación de energía geotérmica de muy baja entalpía (VLEGE), requiere de un conocimiento lo más exacto posible de la capacidad de intercambio de calor del suelo bajo la vivienda con la instalación VLEGE. Esto es fundamental, ya que un cálculo erróneo conlleva normalmente, puesto que la vivienda se cimenta encima de la instalación, una capacidad nula de modificación posterior. De modo que, si la instalación funciona con un rendimiento por debajo del esperado, será preciso un aporte no previsto de energía convencional; por otro lado, si aplicando un criterio conservador, se sobredimensiona la instalación, estaremos originando un sobrecoste innecesario y perjudicial para la competitividad del diseño.

Actualmente, sólo el test de respuesta térmica (TRT) da una respuesta precisa de la capacidad del terreno de transmitir calor a una instalación VLEGE, o lo que es lo mismo de la capacidad de difusividad térmica del terreno. Este test es muy caro de llevar a cabo, y está probablemente injustificado en el caso de viviendas unifamiliares, incluso de pequeños edificios. Los proyectistas de VLEGE actualmente utilizan tablas donde, de forma aproximada y en función del tipo de terreno caracterizado en el ensayo geotécnico, se proporciona un coeficiente de difusividad térmica estimado. Cuando se realizan excavaciones y movimientos de tierra se comprueba, la mayoría de las veces ocurre que el aspecto del terreno en superficie difiere del final a una profundidad dada. En nuestro caso, que nos estamos refiriendo a profundidades en torno a los 4-5 m, diseñar en base a tablas, sin conocer el comportamiento real del terreno a la profundidad donde va ser llevada a cabo la instalación del VLEGE, puede ser una temeridad. Por ello, conocer el coeficiente de difusividad térmica a la profundidad donde va a ser instalada la VLEGE es fundamental para un correcto dimensionado de la misma.

En este capítulo 3 se desarrolla una metodología científica para el cálculo exacto de la difusividad térmica de un terreno; de forma sencilla y, sobre todo, económica. Para ello se aprovechan los ensayos de geotecnia exigidos por la normativa de seguridad estructural para el cálculo de la cimentación (sondeos) y, utilizando la misma perforación, medimos la temperatura del terreno a la profundidad donde va a ser instalada la VLEGE. Esta medida, a través de una sonda experimental desarrollada por el equipo de investigación, permite conocer con exactitud la temperatura del terreno a la profundidad dada y, a partir de ahí, calcular mediante un desarrollo analítico la difusividad térmica del terreno, que constituye el parámetro fundamental para el diseño y dimensionado de la VLEGE.

El capítulo 3 muestra el desarrollo matemático, así como la instrumentación *hardware/software* desarrollada para el cálculo de la difusividad térmica del terreno mediante una simple medida de temperatura a la profundidad donde va a ser instalada la VLEGE. Como todos los desarrollos de esta tesis, se generan instrumentos virtuales que, a través de internet (cable, wifi, telefonía móvil o radio), transmiten todos los datos de interés a las instalaciones del Grupo de Investigación en el Campus Universitario de La Rábida de la Universidad de Huelva, sito en Palos de la Frontera.

El capítulo por último muestra también, en base a medidas con la sonda desarrollada, el comportamiento de la temperatura del suelo

respecto a la profundidad. Se demuestra que éste se ajusta a una función senoidal cuyo valor pico a pico va disminuyendo en función de la temperatura, de modo que a profundidades próximas a 10 m, la función es prácticamente una línea recta de valor la temperatura ambiente media del lugar. Esto, para una zona geográfica como Huelva por ejemplo, significa que una instalación de VLGE bien diseñada, puede proporcionar una temperatura de confort de 20 ºC a una vivienda durante todo el año. Esto significaría no tener prácticamente que usar ningún equipo de climatización durante todo el año.

El capítulo 4 de este trabajo: *Medida simple, rápida y de bajo coste de la transmitancia térmica en la edificación,* pretende llevar a cabo una aportación que creemos fundamental y de extraordinario valor para la aplicación práctica de conseguir edificios MEB a través de la capacidad de aislamiento de su envolvente. Al día de hoy, previo a las aportaciones de esta tesis, la medida de la transmisividad térmica es muy tediosa y cara. Tediosa, porque requiere, en el mejor de los casos, más de tres días de medida, que pueden llegar a semanas o meses. Cara, en parte por lo anterior, y también porque si son precisas medidas en diferentes puntos, como suele ser habitual, hay dos opciones: o se hacen de forma secuencial con un mismo equipo, con el consiguiente coste de tiempo que ello supone, o se precisan tantos equipos actuando de forma simultánea como medidas a realizar, lo cual genera obviamente un coste en instrumentación y personal muy elevado; tanto en la fase de medida como en el posterior procesamiento de las mismas.

En esta tesis hemos desarrollado un sistema de medida rápido, barato y fácil de usar, que permite tomar al mismo tiempo múltiples medidas en un mismo edificio, o incluso en edificios colindantes, cuando se trate de la rehabilitación energética de una manzana o de un barrio completo. Para ello se ha desarrollado un sistema que, al contrario de lo que se hace actualmente, no precisa medir difusividad del calor como tal en la envolvente del edificio, sino sólo obtener medidas de temperatura que, a través de la ecuación diferencial de *Fourier*, conocida en algunos ámbitos como *Ley de enfriamiento de Newton*, nos da el valor de la transmitancia térmica (*U-Value*) de la envolvente.

Nuestra experiencia nos ha enseñado que la clave para obtener una buena medida de transmitancia consiste en conocer cuándo se estabiliza la transferencia de calor a través de la envolvente. Hasta ahora, se han estado utilizando criterios conservadores, de ahí las medidas de tiempo tan largas que aconsejan los fabricantes de los pocos dispositivos comerciales que existen para medir el *U-Value*. Estos dispositivos actúan como *data logger*, recogiendo medidas que son procesadas *off line*. El dispositivo que hemos desarrollado, sin embargo, trabaja en tiempo real recogiendo datos, procesándolos y decidiendo cuándo se estabilizan las medidas (cuándo se estabiliza la transferencia de calor a través de la envolvente) para dar por válido el *U-Value*. Esta característica de nuestro sistema permite poner en práctica una evidencia física; cada medida requiere un tratamiento especial, porque depende del gradiente térmico entre ambas caras de la envolvente y de la naturaleza física de ésta. Por tanto, nosotros no utilizamos criterios conservadores para que la medida sirva para cualquier caso, sino que el equipo trabaja *ad hoc* con cada uno. Esto quiere decir que en algún caso la medida puede llevar horas, y en otro días; pero siempre sólo lo estrictamente necesario que requiera el punto de medida para que la medición obtenida sea válida.

Otro aspecto muy importante del sistema de medida de *U-Value* desarrollado es que el usuario puede definir a voluntad qué tiempo de estabilidad de la medida considera apropiado (esto normalmente lo da la experiencia), así como el umbral de variación que considera adecuado para caracterizar la medida como estable (también lo da la experiencia). Definidos estos parámetros, el sistema actúa de forma automática, midiendo el *U-Value* en el tiempo que se cumplan los parámetros definidos por el usuario.

Por otro lado, el sistema desarrollado es modular, escalable y con funcionamiento inalámbrico, en torno a un *master* que, por un lado se conecta a internet para transmitir los datos de *U-Value* medidos a cualquier parte del

mundo y, por otro, mediante un protocolo *ZigBee* con todos los módulos de medida que el usuario tenga implantados en la vivienda, edificio, o incluso manzana, ya que puede llevar a cabo miles de medidas de forma simultánea y a un precio dos órdenes de magnitud inferior a los equipos comerciales presentes en el mercado. Esta comparativa económica es de un sólo equipo, cuando hablamos de miles de medidas la comparativa no tiene parangón con lo que existe en el mercado.

El capítulo 4 de esta tesis doctoral acaba con resultados y demostraciones experimentales que demuestran las capacidades del equipo y la bondad del desarrollo *hardware/software* llevado a cabo.

El capítulo 5 de este trabajo: uhuMEB: *Metodología de diseño, construcción y operación de edificios de consumo de energía mínimo en clima subtropical,* viene a realizar una aportación metodológica para la integración operativa de las distintas fases de desarrollo de un MEB en clima subtropical. Estas distintas fases incluyen la negociación, el diseño arquitectónico, la ingeniería de instalaciones, la gestión de la construcción y la fase de operación y mantenimiento del MEB. Una herramienta clave para la implementación de esta metodología es el modelo de información del edificio (BIM), con un nivel de desarrollo (LOD) específico para cada fase.

Cada una de las fases diseñadas involucra la participación de uno o varios agentes diferenciados. Así, en la fase de *negociación inicial* participan los promotores del MEB y la firma titular del encargo de edificación. Durante esta fase el promotor presenta las bases del encargo en lo concerniente a criterios objetivos (programa, presupuesto y plazo), y no objetivos (emociones y estética). Ambos grupos de criterios son independientes, y se negocian por separado. Es muy común, en función del tipo de promotor (persona física, institución, administración, empresa, etc.), que éste se muestre interesado más por uno o por ambos. El resultado de la negociación entre las dos partes debe converger en una propuesta de MEB consistente y factible que constituye el objeto del encargo.

Una vez que se inicia la segunda fase, el cliente o promotor pasa a un segundo plano. Ahora es el trabajo técnico el que adquiere protagonismo, más concretamente el trabajo de *diseño arquitectónico* liderado por el arquitecto (o equipo de arquitectura). Es en esta fase donde se concibe la solución formal del MEB, incorporándose la mayoría de las decisiones del diseño pasivo: envolvente térmica, envolvente estanca, diseño solar, factor de forma, ventilación natural, etc.

Una tercera fase, formando parte con la anterior de lo que podríamos denominar etapa de proyecto, es la *ingeniería de instalaciones*, liderada por el ingeniero (o equipo de ingeniería). Es en esta fase donde se incorporan las soluciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC); iluminación; energía geotérmica si procede; agua caliente sanitaria (ACS); energías renovables de superficie y sistemas de instrumentación y control (aquí se incluye la domótica). No parece oportuno dedicar esfuerzos a la implementación de sistemas de máxima eficiencia energética si antes no se ha optimizado el diseño pasivo del MEB. Del resultado conjunto de esta segunda y tercera fase, o etapa de proyecto, obtenemos el certificado energético del proyecto. Este certificado se basa en las simulaciones energéticas del MEB realizadas, y aunque su validez es completa desde el punto de vista teórico no garantiza por sí mismo el rendimiento final del edificio construido.

La cuarta fase de la metodología de diseño MEB propuesta es la fase de *construcción del edificio*. En esta fase, liderada por el *project manager* (o equipo de gestión de obra), se controla que la calidad de lo edificado refleje fielmente las instrucciones incorporadas en fase de proyecto. Se trata de una fase fundamental para la validación de la metodología desarrollada. En ella se hace necesario el control de la continuidad de la envolvente térmica (la mejor opción es mediante técnicas termográficas), el control de la estanqueidad de la envolvente (una técnica muy recomendada para ello es el *blower door test*, BDT) y la instalación a pie de obra de la instrumentación proyectada, tanto para el control de la construcción de la vivienda como para su

equipamiento final (aquí se incluye la domótica). El resultado de esta cuarta fase, construcción del edificio, es el certificado energético de edificio construido. Este certificado deberá estar basado en las mediciones realizadas en fase de obra y durante el primer año completo de vida del edificio. No consiste, por tanto, en repetir las simulaciones energéticas realizadas en fase de proyecto, incorporando las soluciones constructivas finalmente ejecutadas en obra. Debe suponer una garantía sobre el rendimiento real del MEB construido.

La quinta fase de la metodología de diseño MEB desarrollada es la fase de *operación del edificio*, también conocida como *fase de mantenimiento*. En esta fase, liderada por el *ingeniero de mantenimiento* (o equipo de mantenimiento), se analizan y procesan los datos obtenidos a través del sistema de instrumentación instalado en la fase anterior. Además se pueden incorporar inspecciones y mediciones *in situ.* Como resultado de ese análisis se produce un certificado anual de rendimiento del MEB, que es comparado con el certificado energético del edificio construido original. Del resultado de esta comparación dependerá si el MEB continúa operativo bajo las labores de mantenimiento habituales o necesita una rehabilitación energética.

Al final del capítulo se incorpora un caso experimental real para la validación paso a paso de la metodología desarrollada. Se trata de una vivienda unifamiliar aislada en clima subtropical denominada *Casa Zaranda*. En ella se demuestra, de manera pormenorizada, la validez de la metodología propuesta para el diseño de edificios MEB en clima subtropical.
El capítulo 6 de este trabajo: *Rehabilitación energética a escala territorial*, viene a realizar una aportación global al objetivo de este trabajo, por cuanto se trata de una investigación completa y auto contenida sobre las contribuciones realizadas a la rehabilitación energética, capitalizando a escala de barrio, para la mejora significativa de la eficiencia energética en una región de clima subtropical, en concreto referida a la región andaluza.

Si bien en el capítulo 5 se experimentó con una vivienda unifamiliar de nueva construcción, lo cual permitió poner en valor la metodología desarrollada aplicada a vivienda nueva, este capítulo 6 constituye una segunda y más amplia prueba experimental aplicada a la rehabilitación energética de viviendas sociales en las ocho capitales de la Comunidad Autónoma de Andalucía. Se trata de la experiencia desarrollada en el periodo 2014-16 por el Grupo de Investigación *Control y Robótica*, en la ejecución del Proyecto de I+D+i EREBA2020, financiado en convocatoria competitiva con fondos FEDER, por parte de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía.

En la investigación científica desarrollada hemos seguido la metodología propuesta en el capítulo 5, adaptándola a la rehabilitación de edificios en situación de pobreza energética, ya que en la mayoría de las viviendas analizadas se trata de viviendas sociales. Igualmente, hemos utilizado los sistemas de instrumentación y de análisis de datos referidos en ese mismo capítulo 5 para la medición de variables físicas (climatológicas, humedad y temperatura, consumos y generación energética, etc.), y en el capítulo 4 para el U-*Value*. No ha sido posible integrar en la rehabilitación los sistemas VLEGE referidos en el capítulo 3, por tratarse de viviendas en bloques ya existentes, y sin disponibilidad de terreno anexo para enterrar los dispositivos VLEGE. En su lugar hemos validado la contribución de los sistemas de ventilación forzada de doble flujo con recuperación de calor para su incorporación en la rehabilitación energética de viviendas sociales.

En la investigación realizada se incluye el análisis de la aportación de las energías renovables y su adecuada integración arquitectónica (fotovoltaica y micro eólica) en la rehabilitación energética de viviendas. Se han diseñado e instalado dos sistemas de energía renovable completamente diferentes, con objeto de probarlos para ampliar las posibilidades de estudio y el campo de aplicación de los mismos. El primer sistema se basa únicamente en la energía fotovoltaica como recurso renovable de generación, y no cuenta con acumuladores de energía. Se trata de una instalación muy sencilla y viable económicamente. Tiene sentido cuando es posible maximizar el acople de las curvas de producción y de demanda, lo cual se consigue en viviendas con carga de ocupación

significativa durante el día, coincidiendo con las horas de mayor producción energética. El segundo sistema es mucho más flexible, pero también más caro. Consiste en una generación híbrida a partir de energía fotovoltaica y eólica, dotado de un campo de baterías para acumulación energética. Éste es el sistema más adecuado para familias que pasan la mayor parte del día fuera de casa, por su capacidad para funcionar bajo curvas de producción y demanda muy desacopladas. La incorporación de energía eólica le permite además ser un sistema más versátil y compatible con periodos de baja irradiancia solar.

La investigación desarrollada en el capítulo 6 también incluye la fase de negociación inicial con el cliente (en este caso, los propietarios de las viviendas a rehabilitar), y la fase de operación, a través de una aplicación web que se encuentra completamente operativa y accesible por internet en tiempo real [2].

En la fase de negociación inicial resulta muy importante acordar con los usuarios de las viviendas a rehabilitar la compatibilidad de la ejecución de las obras con las condiciones de habitabilidad de las viviendas. Actuar en la mejora de la envolvente desde el exterior y no desde el interior de las viviendas (por lo que supone de molestias de ejecución y pérdida de superficie útil), es algo fundamental en este tipo de rehabilitaciones, máxime cuando se trata de viviendas sociales de primera residencia.

Se ha incorporado, en la fase de operación de las obras de rehabilitación, una aplicación web para el procesado y la presentación de la información de seguimiento, con distintos niveles de acceso para mantenedores, usuarios de viviendas y público en general. Se trata de una herramienta poderosa por cuanto permite el control de funcionamiento de cada vivienda rehabilitada y da visibilidad internacional a la investigación realizada.

Hasta ahora, como resumen del capítulo 6, solo hemos hecho referencia a los prototipos elaborados del mismo, esto es, las labores concretas de rehabilitación llevadas a cabo; sin embargo el proyecto ha ido mucho más allá, lo cual queda reflejado también en el capítulo. En concreto se establece un catálogo de actuaciones sobre el parque nacional de edificios residenciales en Andalucía orientado al ahorro de un 20% de energía en el horizonte 2020. Así,

- Se ha elaborado un mapa territorial de los barrios de crecimiento urbano de los años 50, 60, 70 y 80 en las ocho capitales andaluzas, identificando en cada uno de ellos número de bloques, tipología, orientación, número de plantas, número de viviendas y porcentaje de viviendas ocupadas.

- Se han llevado a cabo planos de los distintos tipos de viviendas representativas existentes en cada crecimiento, proponiendo diferentes soluciones de eficiencia energética; con especial incidencia en la transmisión de calor desde el exterior hacia la vivienda y al revés.

- Se han identificado y analizado en de las zonas de la envolvente de los edificios, su *piel* o partes que lo separan del exterior (muros, ventanas, cubiertas, etc.) en las que las pérdidas de calor son superiores al resto (puentes térmicos).

- Se ha caracterizado mediante simulación por ordenador el consumo energético de los crecimientos estudiados.

- Se ha analizado, mediante simulación por ordenador, diferentes soluciones para la mejora de la eficiencia energética de los crecimientos estudiados.

- Se han diseñado, desarrollado y construido varios sistemas automáticos para la medida de datos en viviendas y su recogida a través de Internet, con objeto de caracterizar su eficiencia energética y proponer las mejoras que procedan.

- Se han comparado y contrastado los estudios teóricos y de simulación por ordenador con datos reales medidos en viviendas seleccionadas, para lo cual han sido dotadas de los sistemas automáticos de medida desarrollados en el proyecto.

- Se han implementado soluciones de generación distribuida de energía renovable: fotovoltaica y microeólica en edificios para reducir la dependencia de la red eléctrica, generar un ahorro en los vecinos y contribuir a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero.

- Se ha evaluado el coste económico del conjunto de mejoras energéticas analizadas para cada edificio tipo.
- Ha sido calculado el periodo de amortización (tiempo en el que el ahorro generado compensa la inversión económica realizada) en cada una de las soluciones de mejora de la eficiencia energética analizada.

- Se ha llevado a cabo la implementación del conjunto de mejoras cuyo periodo de amortización es inferior a 10 años en las viviendas seleccionadas, dotándolas de un sistema automático de recogida de datos que permite la evaluación del consumo de energía real.

- Se está realizando un seguimiento y toma de datos en las viviendas seleccionadas con objeto de analizar los datos obtenidos y compararlos con estudios teóricos y de simulación por ordenador.

- En total se han geolocalizado 372 crecimientos de los años 50, 60 y 70 en las 8 capitales andaluzas, con un total de 293.163 viviendas, lo cual afecta a más de 1.000.000 de habitantes. El criterio seguido para las localizaciones ha sido el de considerar agrupaciones notables por tamaño, en ningún caso inferior a 40 viviendas.

- Se ha puesto en manos de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía un manual operativo presupuestado para poder llevar a cabo una planificación de actuaciones en materia de rehabilitación de viviendas.

1.2 INNOVACIONES QUE APORTA LA TESIS

En esta sección se recorren cada uno de los capítulos que integran esta memoria, destacando las aportaciones novedosas que se hacen en cada uno respecto a la situación del estado del arte antes de abordar las diferentes tareas que conformaron cada capítulo.

El capítulo 2, *Introducción a la eficiencia energética de los edificios*, realiza en primer término una introducción minuciosa del estado del arte en relación a las principales cuestiones planteadas y ya resueltas, así como de los retos aún por resolver en el ámbito de los edificios MEB.

A continuación se compila el marco normativo en vigor relativo a la eficiencia energética de los edificios, incluyendo el ámbito estatal, europeo e internacional. La principal innovación que aporta este apartado sobre normativa proviene de su estudio comparado, y del interés que este estudio tiene para futuros comités de expertos y equipos responsables de la revisión de su respectiva normativa.

A continuación se analizan los diferentes sistemas de certificación existentes dentro y fuera de la UE. De nuevo, la principal innovación supone el estudio comparado de los sistemas de certificación antes descritos, lo que constituye una valiosa herramienta de decisión para el promotor de edificios MEB.

Finalmente, el capítulo 2 termina con un apartado sobre edificios de consumo nulo de energía que supone una innovación por cuanto anticipa la definición de los futuros edificios de balance de energía neta positiva (+ZEB), a partir de la definición inicial de edificio de consumo casi nulo (nZEB). Estos +ZEB serán una realidad en la UE en pocos años, y suponen la aportación del sector de la edificación para la solución al problema del calentamiento global.

El capitulo 3 se denomina *Cálculo de la difusividad térmica del terreno mediante la medida directa de su temperatura. Aplicación a los sistemas de geotermia de muy baja entalpía.*

En él se pone en valor la *Geotermia de muy baja entalpía* para proponer la solución de tubo de aire enterrado como la más adecuada para el acondicionamiento térmico de edificios MEB en clima subtropical, siempre que exista suficiente terreno disponible. Supone una innovación por cuanto se aleja del camino marcado por la mayoría de los sistemas de certificación, concebidos originalmente para el clima frío. Todavía más importancia tiene la solución planteada en este capítulo, completamente novedosa, para la determinación de la difusividad térmica del terreno a partir de la medición directa de su temperatura; lo que constituye una herramienta muy poderosa para arquitectos, geólogos e ingenieros en el diseño y optimización de sistemas de tubo de aire enterrado que hasta el momento se realizan utilizando métodos basados en datos teóricos no siempre representativos. Realmente el conocimiento del coeficiente de difusividad térmica del terreno es el parámetro clave para el diseño adecuado de un sistema VLEGE.

El capítulo 4, *Medida simple, rápida y de bajo coste de la transmitancia térmica en la edificación*, presenta el desarrollo y construcción de un sistema modular y escalable para realizar medidas de transmitancia térmica en las envolventes de los edificios. Partiendo de una sólida fundamentación teórica, se plantea la medida de la transmitancia térmica como un problema que requiere solo de la medida de temperaturas, no de la transmisión del flujo calorífico como se hace hasta hora. Esto simplifica y abarata el desarrollo de equipos para la realización de medidas de transmitancia térmica. En el capítulo se presenta el diseño, desarrollo y construcción de un novedoso sistema inalámbrico que permite a mucho menor coste que los actuales presentes en el mercado, la medida de transmitancia térmica en múltiples puntos de un edificio, e incluso de edificios colindantes, Esto rompe con la disponibilidad actual del mercado, que presenta dispositivos capaces de llevar a cabo una sola medida. Por otro lado, el sistema desarrollado efectúa las medidas en menos tiempo, ya que es capaz de discernir de forma automática cuando una medida es fiable y cuando no. Por último, la interfaz de usuario de la que está dotado, basada en un instrumento virtual, le permite, además de un manejo sencillo y ergonómico, unas capacidades de procesamiento analítico y gráfico excelentes para la interpretación de datos y elaboración de informes.

El capítulo 5 de este trabajo, uhuMEB: *Metodología de diseño, construcción y operación de edificios de consumo de energía mínimo en clima subtropical,* propone una metodología novedosa basada en distintas fases secuenciales de desarrollo de un MEB en clima subtropical. Estas distintas fases incluyen la negociación, el diseño arquitectónico, la ingeniería de instalaciones, la gestión de la construcción y la fase de operación y mantenimiento del MEB. Esta propuesta es novedosa no solo porque es la primera vez que se propone, sino porque supone un avance significativo en el campo MEB, donde hasta hora los criterios arquitectónicos provenían de climas fríos (centro y norte de Europa, Canadá y norte de EE UU fundamentalmente), Nuestra propuesta requiere resolver un grado de complejidad mayor, ya que en clima subtropical el problema a solucionar no es que el calor no se escape de la vivienda, sino que no entre en ella; si bien es cierto que, dependiendo de la zona geográfica, ambas problemáticas se pueden dar a lo largo del año, lo cual complejiza el problema. El capítulo acaba con un caso práctico: diseño, construcción y operación de una casa unifamiliar, que pone en valor, demostrando su utilidad, la novedosa metodología desarrollada. Ésta pretende convertirse en una herramienta indispensable para organizar el flujo de trabajo dirigido al éxito en la concepción y materialización de un MEB. Distingue cada una de las tareas a desarrollar y los objetivos a alcanzar, en función del profesional responsable de cada fase: arquitecto, ingeniero de instalaciones, gerente de proyecto y mantenedor.

El capítulo 6, *Rehabilitación energética a escala territorial*, supone una innovación por cuanto aporta una base de datos completa de más de 366 crecimientos de los años 50, 60 y 70 en las ocho capitales andaluzas, con un total de 291.243 viviendas geolocalizadas en formato *sistema de información geográfica* (SIG) estándar, de las ocho capitales andaluzas. De igual forma se ha caracterizado, utilizando

herramientas de simulación dinámica (*Designbuilder* y *Energy+*), el consumo energético de 264 casos de estudio (ubicación geográfica de la vivienda, orientación y tipo de demanda, bien sea ésta de refrigeración o de calefacción), que abarcan todas las capitales andaluzas, con al menos 33 casos por ciudad. Podemos considerar que la principal innovación de este capítulo lo constituye el hecho de aportar un completo catálogo de soluciones de rehabilitación energética de barrios de los 50, 60 y 70 en Andalucía, ordenadas por ciudad, coste y nivel de reducción de la demanda energética inicial. Este catálogo constituye una herramienta muy valiosa para la administración en la toma de decisiones sobre cómo rehabilitar energéticamente, de la manera más eficiente, el parque público de viviendas en Andalucía. Además, este capítulo puede constituir un verdadero manual de cómo llevar a cabo rehabilitaciones según coste y pretensiones de ahorro energético, ya que se han implementado soluciones diferentes en viviendas prototipo. Éstas han sido analizadas mediante medidas *in situ* y, un par de ellas, han quedado instrumentadas, con desarrollos propios, de modo que de forma permanente y en tiempo real se están recibiendo datos de confort y consumo que reflejan el funcionamiento energético de las casas y el éxito de la rehabilitación llevada a cabo.

1.3 RENDIMIENTO CIENTÍFICO DE LA TESIS

Esta sección está dedicada a enmarcar el entorno científico en el que se ha desarrollado la tesis. En primer lugar se hace mención al Proyecto competitivo de investigación que ha permitido financiar esta tesis. A continuación se exponen los resultados de la investigación realizada; para ello se detallan las publicaciones con índice de impacto así como los capítulos de libro y congresos.

El objetivo principal de esta sección y la siguiente es mostrar que la memoria que se presenta constituye la recopilación ordenada e hilvanada de la producción científica y de transferencia realizada durante los años de desarrollo de esta investigación.

1.3.1 Proyecto de investigación

El proyecto de investigación que ha financiado la Tesis y en el que ha trabajado el doctorando como investigador en formación es:

EREBA2020: *Modelo de estrategia a Largo Plazo para Movilizar Inversiones en la Renovación del Parque Nacional de Edificios Residenciales en Andalucía Orientando al Ahorro de un 20% de Energía en Horizonte 2020*
Código: GGI3002IDIQ
Entidad financiadora: 80% FEDER, 20% Junta de Andalucía.
Periodo: 2011-2015.
Importe: 213.834,59 €.
Investigador responsable: Prof. Dr. José Manuel Andújar Márquez.

1.3.2 Producción científica por capítulos

A continuación exponemos la producción científica de la tesis hasta ahora, detallada por capítulos. Esta tesis ha tenido un trabajo arduo de campo, con desarrollos de prototipos tanto electrónicos como constructivos de obra nueva y rehabilitación. Ahora es cuando comenzamos a plasmar los resultados obtenidos en publicaciones, que siempre tratan de estar en las revistas de más alto impacto en los campos correspondientes a los trabajos realizados. Si bien a día de hoy ya se está empezando a obtener rédito de producción científica plasmada en publicaciones, es de esperar que en los próximos meses éstas se multipliquen, ya que hay una gran cantidad de trabajo esperando salir a la luz.

1.3.2.1 Capítulo 3: ***Cálculo de la difusividad térmica del terreno mediante la medida directa de su temperatura.***

Artículo:

- José Manuel Andújar Márquez, Miguel Ángel Martínez Bohórquez and Sergio Gómez Melgar. Ground thermal diffusivity calculation

by direct soil temperature measurement. Application to very low enthalpy geothermal energy systems. *Sensors* (Switzerland), 2016. 16, 306; doi:10.3390/s16030306.

Índices de calidad: Revista incluida en el JCR en la categoría *Instruments & instrumentation*. Referencia mundial en la ciencia y tecnología de sensores y biosensores. Índice de impacto 2015: 2,033. Pos. 12/56 (Q1).

1.3.2.2 Capítulo 4: *Medida simple, rápida y de bajo coste de la transmitancia térmica en la edificación*

Artículo:

- José Manuel Andújar Márquez, Miguel Ángel Martínez Bohórquez and Sergio Gómez Melgar. Simple, quick and cheap measurement of thermal transmittance (U-Value) in buildings. *Sensors* (Switzerland), 2017. Aceptado.
  Índices de calidad: Revista incluida en el JCR en la categoría Instruments *& instrumentation*. Referencia mundial en la ciencia y tecnología de sensores y biosensores. Índice de impacto 2015: 2,033. Pos. 12/56 (Q1).

1.3.2.3 Capítulo 5: uhuMEB: *Metodología de diseño, construcción y operación de edificios de consumo de energía mínimo en clima subtropical.*

Artículo:

- Sergio Gómez Melgar, José Manuel Andújar Márquez and Miguel Ángel Martínez Bohórquez. uhuZEB: Design, construction and management methodology of zero-energy building in subtropical climate. *Energy and Buidings* (Switzerland), 2017. En revision.

  Índices de calidad: Revista incluida en el JCR en la categoría *Construction & building technology*. Referencia mundial en el ámbito de la construcción. Índice de impacto 2015: 2,973. Pos. 6/61 (Q1).

1.3.2.4 Capítulo 6: *Rehabilitación energética a escala territorial.*

Artículo:

- Sergio Gómez Melgar, José Manuel Andújar Márquez and Miguel Ángel Martínez Bohórquez. Building energy retrofitting methodology in subtropical climate. *Energy and Buidings* (Switzerland), 2017. En revision.

  Índices de calidad: Revista incluida en el JCR en la categoría *Construction & building technology*. Referencia mundial en el ámbito de la construcción. Índice de impacto 2015: 2,973. Pos. 6/61 (Q1).

Capítulo de libro:

- Sergio Gómez Melgar, José Manuel Andújar, Miguel Ángel Martínez. Energy Retrofitting and Social Housing Instrumentation Attending Passive Criteria. Case Study in Winter. *Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering*, pp. 165-178, Springer International Publishing AG 2017, ISBN 978-3-319-51441-3. ISBN 978-3-319-51442-0 (eBook), 2017; doi: 10.1007/978-3-319-51442-0.

  Índices de calidad: Los capítulos publicados en este libro proceden del III International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions, celebrado en Sevilla en marzo de 2017. Estos capítulos han sido seleccionados como los mejores por un examen doble-ciego realizado por un Comité Científico Internacional.

Ponencia en congreso:

- Melgar S.G., Andújar J.M., Bohórquez M.A., Carrasco M.J., Herrero H., Ruiz J.M. Casas del Carmen: rehabilitación de viviendas de balance final de energía neta positiva en clima cálido, utilizando el estándar passivhaus. 7º Conferencia Española Passivhaus. Barcelona (España), 25 – 27 de noviembre de 2015; doi: 10.13140/RG. 2.1.2790.2809.

Índices de calidad: Congreso nacional sobre el estándar passivhaus. Asistencia por invitación.

1.3.3 Estancias de investigación

A continuación exponemos las estancias desarrolladas en el ámbito de esta tesis doctoral.

1.3.3.1 Universidade do Algarve

Como consecuencia directa del trabajo de investigación desarrollado en esta tesis doctoral, este doctorando ha desarrollado una estancia predoctoral de tres meses y medio de duración en un Centro de Investigación de prestigio internacional en el ámbito de esta tesis:

Centro de investigación: Instituto Superior de Engenharia.
Universidad: Universiade do Algarve.
Web: https://ise.ualg.pt/pt
Objeto: Estancia de investigación.
Modalidad: Por invitación
Profesor responsable: Prof. Dr. Jânio Miguel Evangelista Ferreira Monteiro.
Duración: 15 enero 2017 a 30 abril 2017.

1.3.3.2 Nanjing University

Igualmente, como consecuencia directa del trabajo de investigación y la transferencia de resultados desarrollado en esta tesis doctoral; este doctorando ha recibido invitación formal de la Universidad de Nanjing (China), como profesor invitado en calidad de experto internacional, para el desarrollo de una estancia postdoctoral con fines de docencia e investigación:

Centro de investigación: School of Architecture and Urban Planning.
Universidad: Nanjing University.
Web: https://arch.nju.edu.cn/1108/list.htm
Objeto: Estancia de docencia e investigación
Modalidad: Por invitación
Profesor responsable: Prof. Dr. Fu Xiao
Duración: 1 octubre 2017 a 30 noviembre 2017.

1.4 TRANSFERENCIA DE LOS RESULTADOS DE LA TESIS

Los resultados del trabajo científico que sustenta esta tesis doctoral se han transferido de manera directa en la mejora de la eficiencia energética del proyecto y la construcción de edificios MEB. Esto ha sido posible, de manera muy natural e inmediata, como consecuencia de la principal actividad profesional de este doctorando como arquitecto CEO de la oficina de proyectos *Laboratorio de Arquitectura Responsable* (LAR Arquitectura), con sede en Huelva (España), en calle Puerto número 5.

Esta transferencia fue ya iniciada con la presentación del trabajo para la obtención de la suficiencia investigadora y del *Diploma de Estudios Avanzados* titulado *Análisis comparado con criterios de sostenibilidad de dos edificios docentes en clima templado*, dentro del programa de doctorado en *Gestión y salud ambiental* de la Universidad de Huelva, en marzo de 2011. En ese primer trabajo de investigación ya se recogían las aportaciones relacionadas con la sostenibilidad y la disminución de la demanda energética, realizadas a los edificios de 2009 y 2010 *Aulario Isidoro Morales* y *Colegio Salesiano Cristo Sacerdote* (ver figura 1.1). Estas aportaciones fueron presentadas en el trabajo expuesto en noviembre de 2011 en el congreso internacional de construcción sostenible *SB11 Sustainable Building*, en Helsinki (Finlandia).

Mejorar la técnica de construcción de edificios para conseguir que demanden muy poca energía, o incluso que generen más energía de la que ellos mismos consumen, es el fin último de esta investigación.

1.4.1 Transferencia científica por proyectos

Los principales *ítems* obtenidos en la transferencia de resultados de esta tesis doctoral son los proyectos y edificios MEB construidos que se recogen en las figuras 1.1, 1.2 y 1.3; en los que este doctorando ha firmado como arquitecto redactor del proyecto y director de las obras, en colaboración con el equipo de *LAR Arquitectura,* del que actualmente este doctorando es director ejecutivo.

De una manera sucinta, pues de otro modo alargaría la extensión de este documento hasta hacerlo no operativo, vamos a exponer a continuación los aportaciones principales transferidas en cada uno de estos edificios. Para el análisis con más detalle de los aspectos más específicos de cada uno de ellos, nos remitimos a los archivos digitales de visado de los Colegios Oficiales de Arquitectos de Huelva y Badajoz.

Edificio	Programa	Transferencia I+D+i
 **Aulario Isidoro Morales** 2009 Campus El Carmen (Huelva) 37°16'19.7"N 6°55'28.7"W	Edificio de aulas para la ETS Ingeniería de la Universidad de Huelva	**nZEB de uso docente** (nueva planta) Proyecto y obra
 **Guardería Jardín de Luz** 2009 Campus El Carmen (Huelva) 37°16'11.4"N 6°55'30.1"W	Escuela infantil para la comunidad universitaria en el Campus de El Carmen de la Universidad de Huelva	**nZEB de uso docente** (nueva planta) Proyecto y obra
 **Colegio Salesiano Cristo Sacerdote** 2010 Huelva (Huelva) 37°16'21.4"N 6°56'07.3"W	Ampliación y reforma de Colegio. Aulas y talleres de formación profesional	**nZEB de uso docente** (rehabilitación) Proyecto y obra

Figura 1.1 Transferencia científica por proyectos. Años 2009-2010

	Edificio	Programa	Transferencia I+D+i
	**Albergue Municipal** 2010 Huelva (Huelva) 37°16'49.4"N 6°55'47.8"W	Centro de acogida para personas sin hogar	**nZEB de uso asistencial** (nueva planta) Proyecto de Ejecución
	**Casa Zaranda** 2012 Aljaraque (Huelva) 37°17'27.4"N 7°00'27.1"W	Vivienda unifamiliar aislada en La Monacilla	**Vivienda unifamiliar aislada nZEB** (nueva planta) Proyecto y obra
	**Casa de los maestros** 2014 Talarrubias (Badajoz) 39°02'08.3"N 5°14'11.4"W	Centro de día para personas enfermas de Alzheimer y otras demencias	**nZEB de uso asistencial** (rehabilitación) Proyecto y obra
	**Centro Ernest Lluch** 2015 Herrera del Duque (Badajoz) 39°10'01.9"N 5°03'46.6"W	Centro de día para personas enfermas de Alzheimer y otras demencias	**nZEB de uso asistencial** (nueva planta) Proyecto y obra
	**Casas del Carmen** 2015 Huelva (Huelva) 37°16'33.4"N 6°56'53.7"W	Rehabilitación energética de viviendas sociales en barrio de El Carmen	**nZEB de uso residencial** (rehabilitación) Proyecto y obra
	**Frater Huelva** 2015 Huelva (Huelva) 37°16'13.7"N 6°55'48.6"W	Residencia para personas discapacitadas gravemente afectadas	**nZEB de uso hospitalario** (nueva planta) Proyecto y obra
	**Casa de Cáritas** 2015 Huelva (Huelva) 37°15'31.3"N 6°56'37.7"W	Edificio asistencial de uso mixto para Casa de acogida de inmigrantes, Casa de acogida de enfermos, Centro de día de personas sin hogar y Servicios administrativos generales	**nZEB de uso asistencial** (rehabilitación) Proyecto y obra
	**Centro de Respiro Familiar** 2015 Talarrubias (Badajoz) 39°02'08.2"N 5°14'10.0"W	Residencia para personas enfermas de Alzheimer y otras demencias	**nZEB de uso hospitalario** (nueva planta) Proyecto de Ejecución
	**Casa NOAH** 2016 Aljaraque (Huelva) 37°17'24.8"N 7°00'08.4"W	Vivienda unifamiliar aislada en La Monacilla	**Vivienda unifamiliar aislada nZEB** (nueva planta) Proyecto y obra

Figura 1.2 Transferencia científica por proyectos. Años 2010-2016

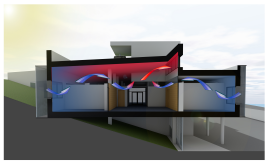
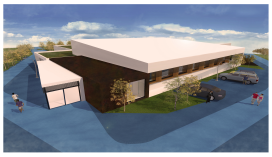
	Edificio	Programa	Transferencia I+D+i
	**La Casita** 2016 Aljaraque (Huelva) 37°16'51.6"N 6°59'50.3"W	Vivienda unifamiliar aislada en La Monacilla	**Vivienda unifamiliar aislada nZEB** (nueva planta) Proyecto y obra
	**Colegio Salesiano Cristo Sacerdote** 2016 Huelva (Huelva) 37°16'22.6"N 6°56'05.8"W	Ampliación de Colegio. Nuevo aulario de infantil, primaria y secundaria	**nZEB de uso docente** (nueva planta) Proyecto y obra
	**Ciudad del Marisco** 2017 Huelva (Huelva) 37°15'59.1"N 6°57'35.9"W	Edificio industrial de uso mixto para la transformación de pescado y marisco en el Puerto de Huelva	**nZEB de uso industrial** (nueva planta) Proyecto y obra (en ejecución)
	**Centro Salud Isla Chica** 2017 Huelva (Huelva) 37°15'30.2"N 6°56'14.2"W	Centro público de atención primaria hospitalaria	**nZEB de uso hospitalario** (nueva planta) Concurso de ideas
	**CEIP Ensanche Sur** 2017 Huelva (Huelva) 37°15'05.0"N 6°57'05.2"W	Colegio público de educación infantil y primaria	**nZEB de uso docente** (nueva planta) Concurso de ideas
	**Piscina cubierta y Gimnasio** 2017 Huelva (Huelva) 37°16'20.3"N 6°56'44.2"W	Nuevas instalaciones en la Ciudad deportiva de Huelva	**nZEB de uso deportivo** (nueva planta) Concurso de ideas
	**Casa Rosal** 2017 Punta Umbría (Huelva) 37°10'43.6"N 6°57'54.7"W	Dos viviendas unifamiliares aisladas en Punta Umbría	**Vivienda unifamiliar aislada nZEB** (nueva planta) Proyecto y obra (en ejecución)

Figura 1.3 Transferencia científica por proyectos. Años 2016-2017

1.4.1.1 Aulario Isidoro Morales

El *Aulario Isidoro Morales* (ver figuras 1.1 y 1.4), se trata de un edificio de 2009 situado en el Campus de El Carmen de la Universidad de Huelva (37°16'19.7"N 6°55'28.7"W). Es un edificio de nueva planta de uso docente, destinado a albergar las aulas de la ETS de Ingeniería de la Universidad de Huelva, en su traslado desde el Campus de La Rábida en Palos de la Frontera (Huelva).



Figura 1.4. Aulario Isidoro Morales

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas al *Aulario Isidoro Morales* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5) y con la incorporación de las técnicas pasivas y la integración de las energías renovables en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La fachada fotovoltaica, perfectamente integrada arquitectónicamente, capaz de producir hasta 72 kWp.
2. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de poliestireno extruido (XPS) y una combinación de fachada ventilada con aislamiento exterior de poliuretano proyectado (PUR) y aislamiento interior de lana mineral (LM) en el trasdosado de tabique de yeso laminado autoportante (TYL).
3. El atrio a triple altura, no acondicionado, que funciona como colchón térmico en tiempo cálido y favorece la recirculación de aire por efecto chimenea.

El *Aulario Isidoro Morales* resultó seleccionado para la exposición del *XX Premio de Arquitectura del Colegio Oficial de Arquitectos de Huelva*.

El *Aulario Isidoro Morales*, resultó galardonado en los premios internacionales de eficiencia energética *Isover Energy Efficiency Best of Awards* (Viena 2009).

1.4.1.2 Guardería Jardín de Luz

La *Guardería Jardín de Luz* (ver figuras 1.1 y 1.5), se trata de un edificio de 2009 situado en el Campus de El Carmen de la Universidad de Huelva (37°16'11.4"N 6°55'30.1"W). Es un edificio de nueva planta de uso docente, destinado a escuela infantil de primer ciclo para la comunidad universitaria de la Universidad de Huelva.



Figura 1.5. Guardería Jardín de Luz

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas a la *Guardería Jardín de Luz* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5) y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La solución constructiva de bajo presupuesto y tipo industrial, de baja inercia térmica.

2. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta trasventilada de chapa grecada de perfil peraltado y fachada de bloque de hormigón con aislamiento interior de LM en el trasdosado de TYL.
3. El patio interior cubierto, no acondicionado, iluminado cenitalmente con luz natural mediante lucernario de doble piel de policarbonato celular, que funciona como espacio colchón destinado a juegos infantiles.

1.4.1.3 Colegio Salesiano Cristo Sacerdote

El *Colegio Salesiano Cristo Sacerdote* (ver figuras 1.1, 1.6 y 1.7), se trata de una reforma integral y una ampliación de un edificio existente de uso docente situado en la Avenida Gómez de Avellaneda de Huelva (37°16'21.4"N 6°56'07.3"W), y realizada en dos fases. La primera fase, en 2010, consistió en una ampliación y reforma de las aulas y talleres de formación profesional. La segunda fase, en 2016, consistió en la edificación de nueva planta de un nuevo aulario de educación infantil, primaria y secundaria; y su conexión al resto del colegio existente.



Figura 1.6. Colegio Salesiano Cristo Sacerdote. Primera fase



Figura 1.7. Colegio Salesiano Cristo Sacerdote. Segunda fase

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas al *Colegio Salesiano Cristo Sacerdote* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5) y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La protección solar de huecos mediante paneles móviles de chapa perforada (primera fase) y lamas verticales orientables (segunda fase).
2. La iluminación y la ventilación natural favorecida por la disposición de huecos en cerramientos opuestos a la fachada donde se abren las ventanas principales del aula (lucernarios en primera fase y ventanas al pasillo exterior en segunda fase).
3. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo por el interior de LM en el trasdosado de TYL y sobre el falso techo acústico de placa de yeso laminado (PYL).
4. La incorporación de un sistema de ventilación de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia, para acondicionar el aula en condiciones de clima frío a partir de las cargas de ocupación del aula (segunda fase).

El edificio *Colegio Salesiano Cristo Sacerdote* resultó seleccionado para la exposición del *XVIII Premio de Arquitectura del Colegio Oficial de Arquitectos de Huelva*.

1.4.1.4 Albergue Municipal de Huelva

El *Albergue Municipal de Huelva* (ver figuras 1.2 y 1.8), se trata de un proyecto de 2010 situado en el PERI de El Seminario de Huelva (37°16'49.4"N 6°55'47.8"W). Se trata del proyecto de un edificio de nueva planta de uso asistencial, destinado a centro de acogida municipal para personas sin hogar. La propuesta resultó ganadora, en colaboración con la empresa constructora *Rafael Morales S.A.,* de un concurso de proyecto y obra

convocado por el Ayuntamiento de Huelva. El proyecto no se ha ejecutado hasta la fecha.



Figura 1.8. Albergue Municipal de Huelva

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas al proyecto de *Albergue Municipal de Huelva* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5) y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica con mínimos puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo por el interior de LM en el trasdosado de TYL y sobre el falso techo acústico de PYL.

1.4.1.5 Casa Zaranda

La vivienda *Casa Zaranda* (ver figuras 1.2 y 1.9), se trata de un edificio de 2012 situado en la urbanización La Monacilla, en Aljaraque (Huelva) (37°17'27.4"N 7°00'27.1"W). Es un edificio de nueva planta de uso residencial, de tipo unifamiliar aislado.

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas a *Casa Zaranda* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5), con la incorporación de la geotermia de baja entalpía para la mejora de edificios MEB (capítulo 3), con la instrumentación y el análisis de datos en edificios MEB (capítulo 4) y con la incorporación de las técnicas pasivas y la integración de las energías renovables en el edificio (capítulo 6).



Figura 1.9. Casa Zaranda

En concreto destacamos:

1. El VLEGE, que permite la ventilación de la vivienda en tiempo extremo, intercambiando calor con el terreno.
2. La instrumentación realizada en la vivienda, con adquisición y análisis de datos de temperatura y humedad, para la mejora de la eficiencia energética del edificio.
3. La envolvente térmica con mínimos puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de XPS y aislamiento interior de LM en el trasdosado de tabicón de ladrillo hueco.
4. La envolvente de máxima estanqueidad mediante el sellado en carpinterías de altas prestaciones y el testeo mediante los ensayos BDT realizados.
5. El patio cubierto a doble altura, que funciona como colchón térmico en tiempo cálido y favorece la ventilación natural nocturna por efecto chimenea en tiempo cálido.
6. El uso de la piscina exterior como sumidero energético de la instalación de placas de ACS.

La vivienda *Casa Zaranda* resultó seleccionada para la exposición del *XX Premio de Arquitectura del Colegio Oficial de Arquitectos de Huelva*.

La vivienda *Casa Zaranda*, resultó galardonada en los premios internacionales de eficiencia energética *II Concurso Iberoamericano Passivhaus* (Gijón 2013) e *Isover Energy Efficiency Best of Awards* (Dublín 2014).

1.4.1.6 Casa de los maestros

La *Casa de los maestros* (ver figuras 1.2 y 1.10), se trata de un edificio de 2014 situado en la calle Colegio Público de Talarrubias (Badajoz) (39°02'08.3"N 5°14'11.4"W). Es la rehabilitación y ampliación de una antigua vivienda para los maestros del pueblo de Talarrubias, para destinarla a Centro de día para personas enfermas de Alzheimer y otras demencias.
Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas al edificio de *Casa de los maestros* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5) y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).



Figura 1.10. Casa de los maestros

En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica con mínimos puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo por el interior de LM en el trasdosado de TYL y sobre el falso techo acústico de PYL.
2. La incorporación de la aerotermia con sistema de alta eficiencia en la producción de ACS.

1.4.1.7 Centro Ernest Lluch

El *Centro Ernest Lluch* (ver figuras 1.2 y 1.11), se trata de un edificio de 2015 situado en la calle Camino de la piscina de Herrera del Duque (Badajoz) (39°10'01.9"N 5°03'46.6"W). Es un edificio de nueva planta destinado a Centro de día para personas enfermas de Alzheimer y otras demencias.



Figura 1.11. Centro Ernest Lluch

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas al edificio de *Centro Ernest Lluch* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios nZEB (capítulo 5), con la instrumentación y el análisis de datos en edificios MEB (capítulo 4) y con la incorporación de técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo por el exterior (SATE) de LM.
2. La envolvente de máxima estanqueidad mediante el sellado y la disposición de juntas auto expansivas en carpinterías de altas prestaciones.
3. La incorporación de la aerotermia con sistema de alta eficiencia en la producción de ACS.
4. La incorporación de un sistema de ventilación de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia.
5. La incorporación de una sonda de CO_2 en el conducto de retorno de ventilación, para garantizar el mantenimiento de la calidad de aire interior del edificio.

1.4.1.8 Casas de El Carmen

Las viviendas *Casas de El Carmen* (ver figuras 1.2 y 1.12), son una rehabilitación energética de 2015, situada en la calle Tres Carabelas de Huelva (37°16'33.4"N 6°56'53.7"W). Se trata de dos pisos de orientaciones opuestas en la cuarta planta de un mismo edificio plurifamiliar entre medianeras de uso residencial de cinco plantas totales.

El proyecto y la obra de rehabilitación energética de *Casas de El Carmen* se trata de una de las actuaciones financiadas con cargo al Proyecto de I+D+i EREBA2020: *Modelo de estrategia a Largo Plazo para Movilizar Inversiones en la Renovación del Parque Nacional de Edificios Residenciales en Andalucía Orientando al Ahorro de un 20% de Energía en Horizonte 2020*, con código: GGI3002IDIQ.



Figura 1.12. Casas de El Carmen

Se trata, por tanto de una actuación clave sin la cual no se podría entender el trabajo de investigación que sustenta esta tesis doctoral, y que analizaremos con mayor detalle como uno de los casos prácticos de rehabilitación energética de viviendas de los años 50, 60 y 70 en el capítulo 6 de este trabajo.

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas a *Casas de El Carmen* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5), con la incorporación de la geotermia de baja entalpía para la mejora de edificios MEB (capítulo 3), con la instrumentación y el análisis de datos en edificios MEB (capítulo 4) y con la incorporación de las técnicas pasivas y la integración de las energías renovables en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La instrumentación realizada en las viviendas, con adquisición y análisis de datos climatológicos, de temperatura y humedad en cada una de las estancias de las viviendas, así como de consumo y producción de energía.
2. La envolvente térmica con mínimos puentes térmicos, a pesar de no haber podido actuar sobre la envolvente completa del edificio, resuelta mediante aislamiento exterior de LM tipo SATE.
3. La envolvente con espacios interiores no calefactados (viviendas abajo y arriba de las actuadas) con aislamiento interior de lana mineral sobre falso techo de PYL y aislamiento reflexivo de 8 mm de espesor bajo solería flotante, compuesto de polietileno extruido sobre lámina de aluminio.
4. La envolvente de máxima estanqueidad mediante el sellado en carpinterías de altas prestaciones y el testeo mediante los ensayos BDT realizados.
5. La incorporación de la aerotermia como sistema de apoyo a la energía solar térmica para la máxima eficiencia en la producción de ACS.
6. La incorporación de un sistema de ventilación de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia.
7. La incorporación de las energías renovables (fotovoltaica y micro eólica) en la cubierta del edificio, con y sin acumulación de energía en baterías, para avanzar en el objetivo de +ZEB.

1.4.1.9 Frater Huelva

Frater Huelva (ver figuras 1.2 y 1.13), es un edificio de 2015 situado en la avenida de Andalucía esquina avenida de Honduras de Huelva (37°16'13.7"N 6°55'48.6"W). Es un

edificio de nueva planta destinado a Residencia de personas discapacitadas físicas gravemente afectadas. Cuenta además con un Centro de día y con la Sede administrativa de la asociación.



Figura 1.13. Frater Huelva

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas a *Frater Huelva* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5) y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La protección solar de huecos mediante paneles plegables de chapa aplacada en continuidad con el revestimiento de la fachada.
2. La iluminación natural de los espacios interiores de circulación mediante lucernarios en los descansillos entre habitaciones.
3. La envolvente térmica con mínimos puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo por el interior de LM en el trasdosado de TYL y bajo solería .

El edificio *Frater Huelva* resultó seleccionado para la exposición del *XXIII Premio de Arquitectura del Colegio Oficial de Arquitectos de Huelva*.

El edificio *Frater Huelva* resultó seleccionado para los *VI Premios Porcelanosa de Arquitectura e Interiorismo (Madrid 2013).*

1.4.1.10 Casa de Cáritas

La *Casa de Cáritas* (ver figuras 1.2 y 1.14), se trata de un edificio complejo de 2015 situado en la calle Doctor Cantero Cuadrado de Huelva (37°15'31.3"N 6°56'37.7"W). Es la rehabilitación y ampliación por fases de parte de un edificio catalogado destinado a residencia universitaria, para su uso mixto como Casa de acogida de inmigrantes, Casa de acogida de enfermos, Centro de día de personas sin hogar y Servicios administrativos generales.

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas a la *Casa de Cáritas* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5) y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).



Figura 1.14. Casa de Cáritas

En concreto destacamos:

1. La iluminación natural de los espacios interiores de circulación mediante lucernarios en el paso hacia la zona de duchas.
2. La mejora de la envolvente térmica existente con un aislamiento continuo por el interior de LM en el trasdosado de placas de escayola de la cubierta.
3. La renovación del sistema de HVAC completo con caldera de alta eficiencia.

4. La incorporación de un sistema de generación solar térmica para ACS.

1.4.1.11 Centro de Respiro Familiar

El *Centro de Respiro Familiar* (ver figuras 1.2 y 1.15), se trata de un edificio de 2015 situado en la calle Alfareros de Talarrubias (Badajoz) (39°02'08.2"N 5°14'10.0"W). Es un proyecto de edificio de nueva planta destinado a Residencia para personas enfermas de Alzheimer y otras demencias. El proyecto no se ha ejecutado hasta la fecha.



Figura 1.15. Centro de Respiro Familiar

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas al edificio de *Centro de Respiro Familiar* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5), con la instrumentación y el análisis de datos en edificios MEB (capítulo 4) y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo tipo SATE de LM.
2. La envolvente de máxima estanqueidad mediante el sellado y la disposición de juntas auto expansivas en carpinterías de altas prestaciones.
3. La incorporación de la aerotermia con sistema de alta eficiencia en la producción de ACS.
4. La incorporación de un sistema de ventilación de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia.
5. La incorporación de una sonda de CO_2 en el retorno del sistema de ventilación, para garantizar el mantenimiento de la calidad de aire interior del edificio.

1.4.1.12 Casa NOAH

La vivienda *Casa NOAH* (ver figuras 1.2 y 1.16), se trata de un edificio de 2016 situado en la urbanización La Monacilla, en Aljaraque (Huelva) (37°17'24.8"N 7°00'08.4"W). Es un edificio de nueva planta de uso residencial, de tipo unifamiliar aislado.



Figura 1.16. Casa NOAH

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas a *Casa NOAH* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5), y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo por el interior de LM en el trasdosado de TYL, sobre el falso techo de PYL y bajo solera flotante en contacto con el terreno.
2. La incorporación de la aerotermia con sistema de alta eficiencia en la producción de ACS.
3. La protección solar de huecos que permita la entrada de radiación solar en invierno y la

evita en verano mediante la optimización de la longitud de los voladizos a sur y este.

1.4.1.13 La Casita

La vivienda *La Casita* (ver figuras 1.3 y 1.17), se trata de un edificio de 2016 situado en la urbanización La Monacilla, en Aljaraque (Huelva) (37°16'51.6"N 6°59'50.3"W). Es un edificio de nueva planta de uso residencial, de tipo unifamiliar aislado.



Figura 1.17. La Casita

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas a *La Casita* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5), y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica con mínimos puentes térmicos, resuelta mediante cubierta inclinada con aislamiento interior de LM, un aislamiento continuo por el interior también de LM en el trasdosado de tabicón de ladrillo cerámico y bajo solera flotante en contacto con el terreno.
2. La incorporación de la aerotermia con sistema de alta eficiencia en la producción de ACS.
3. La protección solar de huecos que permita la entrada de radiación solar en invierno y la evita en verano mediante la optimización de la longitud de los voladizos a sur.

1.4.1.14 Ciudad del Marisco

Ciudad del Marisco (ver figuras 1.3 y 1.18), se trata del proyecto un edificio de 2017 situado en la avenida de Enlace esquina calle Alonso de Ojeda, dentro del Polígono pesquero norte, en el área portuaria de Huelva (37°15'59.1"N 6°57'35.9"W). Es un edificio de nueva planta industrial de uso mixto para la transformación de pescado y marisco en el Puerto de Huelva. En la fecha de depósito de esta tesis doctoral la obra de *Ciudad del del Marisco* se encuentra en fase de licitación de empresas constructoras.

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas al proyecto de *Ciudad del Marisco* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5), y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).



Figura 1.18. Ciudad del Marisco

En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo por el interior de LM en el trasdosado de panel preformado de calidad alimentaria y LM bajo solera flotante en contacto con el terreno.

2. La incorporación de la aerotermia como sistema de alta eficiencia en la producción de ACS.

1.4.1.15 Centro de Salud Isla Chica

El *Centro de Salud Isla Chica* (ver figuras 1.3 y 1.19), se trata de un proyecto presentado a concurso en 2017 situado en la calle Pedro Alonso Niño de Huelva (37°15'30.2"N 6°56'14.2"W). Es un edificio de nueva planta destinado a Centro público de atención primaria hospitalaria. En la fecha de depósito de esta tesis doctoral se encuentra en fase de licitación de servicios técnicos.

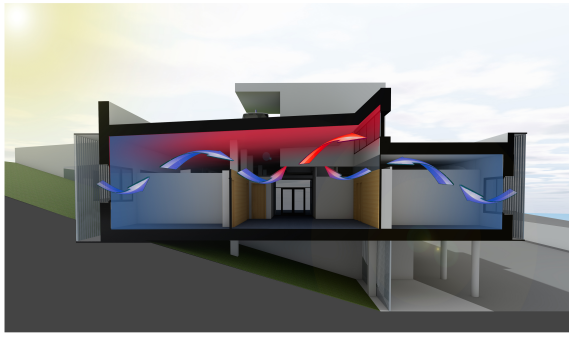


Figura 1.19. Centro de Salud Isla Chica

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas al proyecto de *Centro de Salud Isla Chica* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5), y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).

En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo tipo SATE y por el interior de LM en el trasdosado de TYL, y sobre el falso techo de PYL.
2. La incorporación de la aerotermia como sistema de alta eficiencia en la producción de ACS.
3. La protección solar de huecos que permita la entrada de radiación solar en invierno y la evita en verano mediante la optimización de la longitud de los voladizos.
4. La incorporación de un sistema de ventilación de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia.
5. La envolvente de máxima estanqueidad mediante el sellado en carpinterías de altas prestaciones y el testeo mediante los ensayos BDT realizados.

1.4.1.16 CEIP Ensanche Sur

El *CEIP Ensanche Sur* (ver figuras 1.3 y 1.20), se trata de un proyecto presentado a concurso en 2017 situado en un solar del PAU1 Ensanche Sur de Huelva (37°15'05.0"N 6°57'05.2"W). Es un edificio de nueva planta destinado a Colegio público de educación infantil y primaria. En la fecha de depósito de esta tesis doctoral se encuentra en fase de licitación de servicios técnicos.
Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas al proyecto de *CEIP Ensanche Sur* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5), y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).



Figura 1.20. CEIP Ensanche Sur

En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con

aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo tipo SATE y por el interior de LM en el trasdosado de TYL, y sobre el falso techo de PYL.
2. La incorporación de la aerotermia como sistema de apoyo a la energía solar térmica para la máxima eficiencia en la producción de ACS.
3. La protección solar de huecos que permita la entrada de radiación solar en invierno y la evita en verano mediante la incorporación de lamas verticales y la optimización de la longitud de los voladizos.
4. La incorporación de un sistema de ventilación de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia acoplado a un VLEGE.
5. La envolvente de máxima estanqueidad mediante el sellado en carpinterías de altas prestaciones y el testeo mediante los ensayos BDT realizados.

1.4.1.17 Piscina cubierta y Gimnasio

La *Piscina cubierta y Gimnasio* (ver figuras 1.3 y 1.21), se trata de un proyecto presentado a concurso en 2017 situado en la avenida Manuel Siurot, dentro de la Ciudad Deportiva de Huelva (37°16'20.3"N 6°56'44.2"W). Es un edificio de nueva planta destinado a piscina cubierta y gimnasio. En la fecha de depósito de esta tesis doctoral se encuentra en fase de licitación de servicios técnicos.

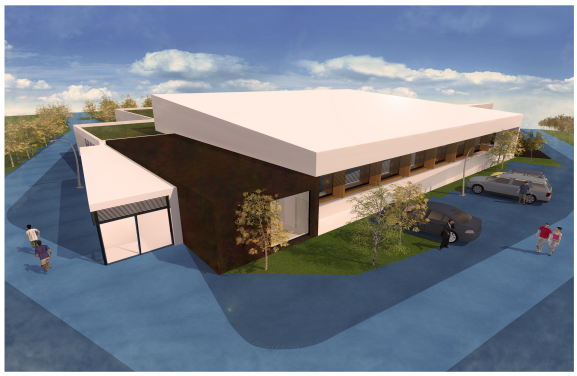


Figura 1.21. Piscina cubierta y Gimnasio

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas al proyecto de *Piscina cubierta y Gimnasio* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5), y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).
En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo tipo SATE y por el interior de LM en el trasdosado de TYL, y sobre el falso techo de PYL.
2. La iluminación y la ventilación natural favorecida por la disposición de huecos en cerramientos opuestos a la fachada donde se abren las ventanas principales del espacio de las piscinas.
3. La incorporación de la aerotermia como sistema de apoyo a la energía solar térmica para la máxima eficiencia en la producción de ACS.
4. La protección solar de huecos que permita la entrada de radiación solar en invierno y la evita en verano mediante la optimización de la longitud de los voladizos.
5. La incorporación de un sistema de ventilación de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia acoplado a un dispositivo VLEGE.
6. La envolvente de máxima estanqueidad mediante el sellado en carpinterías de altas prestaciones y el testeo mediante los ensayos BDT realizados.

1.4.1.18 Casa Rosal

La vivienda *Casa Rosal* (ver figuras 1.3 y 1.22), se trata del proyecto de un edificio de 2017 situado en la calle Rosal, en Punta Umbría (Huelva) (37°10'43.6"N 6°57'54.7"W). Es un proyecto de nueva planta de uso residencial, para dos viviendas de tipo unifamiliar aislado. En la fecha de depósito de esta tesis doctoral *Casa Rosal* se encuentra en fase de desarrollo del proyecto de ejecución.

Las aportaciones de esta tesis doctoral transferidas a *Casa Rosal* tienen que ver con la adaptación del concepto de MEB al clima subtropical (capítulo 2), con la incorporación de

la metodología integrada propuesta en el proyecto y la construcción de edificios MEB (capítulo 5), y con la incorporación de las técnicas pasivas en el edificio (capítulo 6).



Figura 1.22. Casa Rosal

En concreto destacamos:

1. La envolvente térmica sin puentes térmicos, resuelta mediante cubierta invertida con aislamiento exterior de XPS y un aislamiento continuo por el interior de LM en el trasdosado de TYL, sobre el falso techo de PYL y bajo solera flotante en contacto con el terreno.
2. La incorporación de la aerotermia como sistema de alta eficiencia en la producción de ACS.
3. La protección solar de huecos que permita la entrada de radiación solar en invierno y la evita en verano mediante la optimización de la longitud de los voladizos a sur y este.
4. La envolvente de máxima estanqueidad mediante el sellado en carpinterías de altas prestaciones y el testeo mediante los ensayos BDT realizados.
5. La iluminación y la ventilación natural favorecida por la disposición de huecos en cerramientos opuestos a la fachada donde se abren las ventanas del espacio del salón y habitación principal.

1.4.2 Transferencia científica por colaboraciones con universidades y empresas internacionales

Este doctorando, en representación del equipo de *LAR Arquitectura* y del Grupo de investigación *Control y Robótica,* ha establecido numerosas colaboraciones con empresas y universidades internacionales de gran prestigio en el ámbito de la arquitectura y la ingeniería, con la finalidad de compartir el conocimiento científico generado en el desarrollo de este trabajo de investigación. Estas colaboraciones han sido en buena parte posibles gracias a la labor facilitadora realizada por *Extenda*, Agencia Andaluza de Promoción Exterior.

El principal objetivo de estas colaboraciones, ha sido compartir el *know how* de ambos equipos, en todo lo relacionado con el diseño y la construcción de edificios de consumo de energía mínima.

La transferencia científica se ha concretado en la realización de *workshops* breves (entre una y tres horas de duración), realizados en la sede corporativa de la empresa o universidad, y con presencia de socios principales y directores de equipo de cada una de las entidades visitadas.

Este conjunto de *workshops* han sido materializados durante los tres últimos años de investigación de esta tesis, en la forma de tres misiones de transferencia comercial a las ciudades de Shanghai, Hangzhou, Chengdu, Chongqing y Qingdao en China (abril 2014 y junio 2015); y a las ciudades de Los Ángeles, San Francisco y Seattle, en USA (noviembre 2016).

De una manera sucinta, pues de otro modo alargaría la extensión de este documento hasta hacerlo no operativo, vamos a exponer a continuación el listado completo de empresas y universidades visitadas, con las que se ha realizado transferencia de los resultados de investigación de esta tesis.

1.4.2.1 Transferencia científica por colaboración con universidades internacionales

1. **Tongji University. College of Architecture and Urban Planning**
   Siping Campus de la Universidad de Tongji (Siping Road 1239), Shanghai , China
   http://www.tongji-caup.org/

2. **Zhejiang University. College of Civil Engineering and Architecture**
   Room 308 Yueya Building No. 388 Yuhangtang Road, Zi Jin Gang Campus, Zhejiang University, Hangzhou , China
   http://www.ccea.zju.edu.cn/english/
3. **Chongqing University. Faculty of Architecture and Urban Planning**
   1st Floor, Architecture Building, Chongqing University Campus B, 83 Shabei Street, Shapingba District. Chongqing, China
   http://chongjian.cqu.edu.cn/

4. **School of Architecture. Qingdao Technological University**
   School of Arquitecture, South Campus, No.11 Fushun Road, Sifang District, Qingdao. China
   http://jianzhu.qtech.edu.cn/

1.4.2.2 Transferencia científica por colaboración con empresas internacionales

1. **Dushe Architectural Design**
   Room 1307-1311 SIPG, No. 358 Dongdaming Road, Shanghai, China
   www.shdsd.cn

2. **Fudan Design Institute**
   Building 2, Shanghai Fudan University Science Park, No. 127 Guotai Rd., Yangpu District, Shanghai, China
   http://fudandesign.com/
3. **Shanghai YingXiang Architectural Design Co. Ltd.**
   No. 109-1 Qinzhou Rd (Yian Business Building, 6th floor), Shanghai, China
   http://www.shyxad.com/

4. **La Cime Architectural Design**
   No. 328 Wusong Road Yaojiang International Tower, Hongkou District, Shanghai, China
   http://www.lacime-sh.com/

5. **Zhejiang Hualei Architectural Design Consulting Co., Ltd.**
   3F, International Center, No. 92 North Baochu Road, Hangzhou, China

6. **K-TOTEM Architectural Design Co., Ltd.**
   6F, Building 3, No.138 Tian Fu Er Street, Gaoxin District, Chengdu, China

7. **Sichuan Panzhihua Planning and Design Institute**
   17F, Building 3, No.387 Tianren Road, Gaoxin District, Chengdu, China

8. **Gohen Design**
   8th Floor, no. 88 Fucheng Middle Avenue, Chengdu, China
   www.scghsj.net

9. **Chongqing Boding Architectural Design**
   7F, Building A, No. 118, Da Ping Zheng Street, Yuzhong District, Chongqing, China
   www.cqjzsj.com

10. **Chongqing Tang Lunzhi Design Architects Ltd.**
    2-6-4, No.34 Nancheng Road, Nanan District, Chongqing, China
    www.cqtlz.com

11. **Shanghai Pacer Architects**
    No.128 Huayuan Road, Hongkou District, Shanghai. China
    http://www.pacer.com.cn/

12. **Hangzhou Union Architectural Design Co. Ltd.**
    B2-406 West Lake International Technology Building, No. 391 Wener Road, Hangzhou, Zhejiang Province. China
    http://www.un-dp.com/

13. **Lycs Architecture**
    18F, South Building, No.466 Yan An Road, Xiacheng District, Hangzhou. China
    http://lycs-arc.com/

14. **Qingdao Public Architecture Design Co. Ltd.**
    12A, Jinhu Road, Shinan District, Qingdao, Shandong Province, China
    http://www.qdgyjz.com/

15. **Qingdao Institute of Civilian Architectural Design**
    2/F, Hong Kong Building, No. 27 Shandong Road, Qingdao, Shandong Province, China
    http://qiad.com/

16. **Momoo Place / Shandong Yijing Engineering Consulting Co. Ltd.**

Hong Kong Yuyuan Road, Edificio B, N ° 75, Piso 10, Qingdao. China
www.yijingdesign.com/

17. **Qingdao Tourism Planning and Architecture Design Institute**
No. 2, Shaoxinsan Road, Qingdao . China
http://qdlygh.com/

18. **US Green Building Council - LA**
800 Wilshire Blvd, 16th floor, Los Angeles. USA
http://usgbc-la.org

19. **Buro Happold and RBB**
800 Wilshire Blvd, Los Angeles. USA
http://www.burohappold.com/contact/office/los-angeles/

20. **Lehrer Architects**
2140 Hyperion Avenue, Los Angeles. USA
http://www.lehrerarchitects.com

21. **Callison RTKL**
333 S Hope St c200, Los Angeles. USA
https://www.zgf.com

22. **ZGF**
515 South Flower Street, Suite 3700, Los Angeles. USA
https://www.zgf.com

23. **Ankrom Moisan**
1014 Howard St, San Francisco, USA
http://www.ankrommoisan.com

24. **KMD**
222 Vallejo Street, San Francisco, USA
http://www.kmdarchitects.com

25. **AIA-Latino**
Cambria Gallery, 1045 Bryant St, San Francisco, USA
http://aiasf.org/get-involved/committees/latinos-in-architecture/

26. **Berger Partnership**
1721 8Th Ave N, Seattle, USA
http://www.bergerpartnership.com/

27. **Johnson Architecture and Planning**
2124 Third Avenue Suite 200, Seattle, USA
http://www.j-arch.com/reachout

28. **ZGF**
925 4th Ave #2400, Seattle, USA
https://www.zgf.com

29. **SRG**
110 Union St #300, Seattle, USA
http://www.srgpartnership.com

30. **AIA-Seattle International Architects Forum (SIAF) at NAC**
2025 1st Ave #300, Seattle, USA
http://www.nacarchitecture.com

31. **Framework**
1429 12th Ave, Suite D, Seattle, USA
http://weareframework.com/contact/

32. **Mithun**
1201 Alaksan Way, #200, Pier 56, Seattle, USA
http://mithun.com

33. **Drive Decisions**
220 2nd Ave. S. Seattle , USA
https://home.drivedecisions.com/

Contribuciones desde la Arquitectura y la Ingeniería a los edificios de energía mínima TESIS DOCTORAL



Capítulo 2

Introducción a la Eficiencia Energética en Edificios

2. INTRODUCCIÓN A LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS

En el primer capítulo de esta tesis doctoral se ha realizado un planteamiento general de su contenido, destacando las innovaciones que aporta al estado del conocimiento científico de la eficiencia energética en edificios, así como su rendimiento científico y la transferencia realizada de sus resultados de investigación al mundo de la empresa. Se trata por tanto de un capítulo inicial que refleja un resumen general de todo lo que se tratará en los siguientes, y directamente conectado con el contenido de todos ellos.

Este segundo capítulo de la tesis doctoral tiene por objetivo introducir los principales conceptos relacionados con la eficiencia energética en los edificios, así como revisar el estado del arte del conocimiento científico más actualizado en esta materia.

En este segundo capítulo también se expone el marco regulatorio nacional e internacional relacionado con la eficiencia energética en edificios, distinguiendo normativa de obligado cumplimiento con carácter vinculante de otro tipo de certificaciones que tienen carácter voluntario.

Este segundo capítulo concluye con el desarrollo del concepto de edificio MEB, concepto ya introducido en el capítulo anterior y que engloba de manera genérica a los de nZEB, ZEB y +ZEB.

Como primera aportación específica de este capítulo, destacamos la importancia de adaptar las estrategias de diseño del MEB a las condiciones específicas del clima cálido. Una segunda aportación consiste en identificar la importancia de validar las estrategias de diseño MEB realizadas en base a la simulación energética por *software*, confrontándolas con la instrumentación del MEB y el análisis de los datos obtenidos. Una tercera aportación, consiste en la importancia de integrar las fases de negociación con el cliente y de servicio del MEB en el proceso de diseño. Una cuarta aportación, consiste en la identificación, a partir de la revisión del estado del arte realizada, de aspectos clave para la mejora de la eficiencia energética en edificios que hoy por hoy quedan fuera de las regulaciones de obligado cumplimiento en nuestro país como es la incorporación de las energías renovables en los MEB y su necesaria integración arquitectónica. La quinta aportación específica de este capítulo, consiste en identificar la importancia de la rehabilitación energética de edificios existentes para la reducción significativa del consumo de energía en el sector de la edificación a escala de ciudad y a escala territorial.

Finalmente, el estudio comparado realizado de las principales certificaciones voluntarias disponibles constituye una importante aportación de este capítulo, por lo que supone de herramienta para la toma de decisiones del promotor interesado en el desarrollo de edificios energéticamente eficientes.

Este segundo capítulo de la tesis doctoral se estructura de la forma que sigue. En el primer apartado realizamos una revisión del estado del arte del conocimiento científico, en relación al concepto de eficiencia energética en edificios y al concepto de edificios MEB. En el segundo apartado planteamos una visión del marco normativo actual en materia de eficiencia energética en los edificios, distinguiendo normativa española de normativa europea y por último normativa en el ámbito internacional. En el tercer apartado de este capítulo exponemos y comparamos lo más esencial de los principales sistemas de certificación voluntaria de edificios (*Passivhaus*, *LEED*, *BREEAM*, *Tristar-GBL*, etc.). En el cuarto apartado de este capítulo desarrollamos el concepto de MEB, abundando en cómo conseguirlo. Finalmente, reservamos el quinto y último apartado para establecer las conclusiones de este capítulo y su conexión con el resto de capítulos de esta tesis.

2.1 INTRODUCCIÓN

La directiva europea 2012/27/UE [1] y posterior recomendación (UE) 2016/1318 [3] obliga a los países miembros a garantizar que a fecha de 31 de Diciembre de 2020, todos los edificios nuevos dentro de la Unión Europea (UE) tengan un consumo de energía casi nulo. La manera de alcanzar ese ambicioso objetivo está todavía pendiente de concretar. El propio concepto de nZEB, que es el único introducido todavía en la legislación, está todavía por definir en muchos países de la UE, España entre ellos. Una adecuada combinación de medidas pasivas y activas debe ser adoptada en la solución final del edificio para alcanzar ese objetivo [4-6].

Mucho se ha investigado en los últimos años en relación al problema de cómo reducir el consumo de energía en la edificación [7-12]. Según *Eurostat,* el sector de la edificación representa cerca del 40% del consumo final de energía en la UE [13], lo que lo convierte en un objetivo estratégico para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), responsables del fenómeno del calentamiento global de nuestro planeta.

No existen recetas ni soluciones universales para el problema de cómo reducir el consumo energético en los edificios; ya que aspectos como el uso, la tipología edificatoria, el sistema constructivo, el nivel de ocupación, el diseño arquitectónico, pero sobre todo las condiciones climatológicas específicas del lugar, son variables independientes que modifican la mejor solución posible de la ecuación de eficiencia [14-16].

Centrándonos sólo en la última de estas variables (el clima), pronto descubrimos que, por ejemplo, no siempre resultan aplicables al clima templado las estrategias que han demostrado su utilidad en climas fríos continentales, y viceversa.

Históricamente, la carestía de medios técnicos y económicos ha producido construcciones bien adaptadas al medio ambiente, que resultan confortables sacando partido a las técnicas pasivas propias de la arquitectura vernácula [17-22]. Tipos propios de climas meridionales como la *domus* romana, la trama urbana de la judería, el agua en la arquitectura nazarí, la casa patio andaluza, etc., son ejemplos de cómo la arquitectura puede adaptarse al medio propiciando un confort térmico adecuado sin aporte de energía activa.

Las primeras aproximaciones desde un punto de vista científico, en relación al impacto de los edificios en el medio ambiente, surgieron en países centroeuropeos como Austria y Alemania; y desde allí se transmitieron rápidamente hacia los países más septentrionales de la UE como Finlandia, Dinamarca, Suecia, Noruega y Reino Unido.

Es por esto que la mayoría de los estudios tradicionales de eficiencia energética en edificios [23-29] se centran en analizar el problema en climas fríos, lo que ha generalizado un conjunto de soluciones que no son tales en otros climas. La solución que aportan las estrategias pasivas se complejiza en condiciones exteriores de clima cálido: ecuatorial, tropical y subtropical. Esto se debe fundamentalmente a que el sentido del flujo de calor a través de la envolvente se invierte. Ya no se trata de evitar que el calor escape del interior del edificio, sino de evitar que éste entre al edificio desde el exterior. En este caso, las cargas internas generadas por radiación solar, iluminación artificial, ocupación y otros en función del uso (cocción y refrigeración de alimentos en viviendas, por ejemplo), no hacen sino agravar el problema, en lugar de contribuir a su solución.

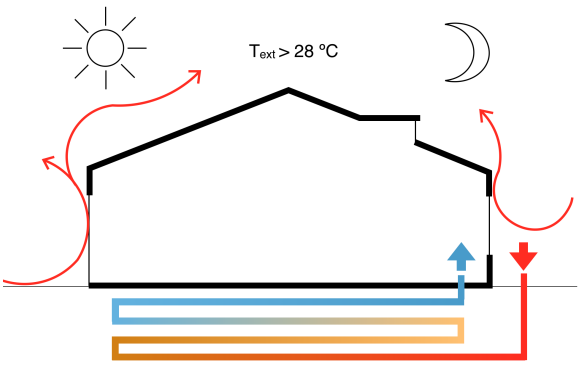


Figura 2.1 Esquema de funcionamiento de una MEB en condiciones de clima exterior desfavorable (envolvente estanca)

Centrándonos en el área subtropical, una particularidad importante de este clima es que sí que hay unos pocos meses al año en los que la pauta climatológica es asimilable a clima frío. De modo que no es posible atender las necesidades de confort de una vivienda siguiendo una misma estrategia durante todo el año (figuras 2.1 y 2.2).

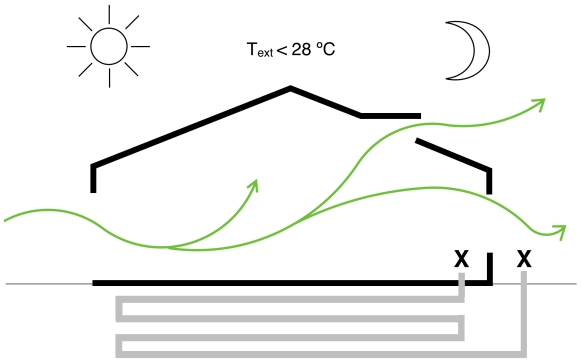


Figura 2.2 Esquema de funcionamiento de una MEB en condiciones de clima exterior favorable (envolvente permeable)

Entre aquellos estudios que entran a analizar el comportamiento de edificios en clima subtropical [30-36], la mayoría utilizan metodologías basadas exclusivamente en simulaciones energéticas realizadas con aplicaciones informáticas. El problema de extraer conclusiones definitivas basadas en datos producidos por aplicaciones informáticas, es que la validez científica de éstos está condicionada por diversos factores como el algoritmo interno de cálculo utilizado, los datos climatológicos disponibles para la ubicación de referencia, el conjunto de simplificaciones aplicadas al modelo de edificio real, etc. Si bien la simulación energética del edificio puede ser considerada como un paso previo de interés, la obtención de resultados concluyentes exige aplicar un método de estudio basado en el análisis e interpretación de variables físicas obtenidas por la instrumentación del edificio en condiciones reales de servicio [37-43].

El modelo tradicional de diseño asistido por ordenador (CAD) hace tiempo que ha sido superado por el de BIM. Este nuevo estándar de software orientado a la arquitectura y la ingeniería, constituye una herramienta muy potente para la toma de decisiones en todas las fases del proyecto [44-53]. Consiste en una compleja base de datos gráfica y numérica del proyecto, con múltiples entradas y salidas de información que se actualiza en *teamwork*, manteniendo siempre la coherencia del modelo, y que resulta un documento entregable en sí mismo (no condicionado únicamente a la producción de planos, memorias, etc., en soporte tradicional).

Buena parte del éxito en la reducción de la demanda energética del edificio queda condicionado por una adecuada toma de decisiones durante las fases iniciales del diseño arquitectónico (estudios previos y anteproyecto) [54, 55]. No cabe olvidar que el consumo de energía del edificio construido es sólo uno de los problemas a resolver por el proyectista en todo el proceso de diseño. Casi nunca el principal desde la perspectiva del promotor.

No obstante, este diseño energético conceptual inicial, que fundamentalmente está centrado en el planteamiento de estrategias pasivas, debe ser completado en fase de desarrollo del proyecto de ejecución con la integración de las HVAC, lo que supone un desarrollo de gran complejidad que implica la integración holística de diferentes profesionales y consultorías específicas. Es por ello que resulta del todo ingenuo pretender resolver la complejidad inherente al proceso edificatorio hoy en día, de una manera científica y ordenada, sin apoyarse en herramientas de integración de la información del tipo BIM en lugar de los CAD tradicionales [56-61].

Es bien sabida la importancia de la fase de ejecución material de la obra, para garantizar que el comportamiento del edificio real se corresponde con el del MEB proyectado. Sería, por tanto adecuado, distinguir entre proyecto de edificio MEB y edificio construido MEB. Esta distinción implica la necesidad de implementar una serie de pruebas in situ que controlen el resultado final del objeto edificado. Algunos estudios [62-67] proponen pruebas específicas basadas en la termografía, el control de infiltraciones y el control de ejecución de HVAC para realizar este garantizar la calidad final del edificio ejecutado.

Incluso algunos estudios [68-72] llegan más allá, proponiendo que durante la fase de operación del edificio es igualmente imprescindible actuar para poder hablar con certeza de la consecución del objetivo de MEB. Según estos autores, muchas de las mayores reducciones de consumo de energía en edificios se consiguen haciendo un uso adecuado del termostato, la iluminación o realizando un adecuado mantenimiento predictivo de las HVAC.

2.2 MARCO NORMATIVO ACTUAL

Entendemos por marco normativo aquel que fija las regulaciones de obligado cumplimiento en materia de eficiencia energética en edificios que regulan la actividad profesional de los distintos agentes del proceso edificatorio: promotores, constructores, proyectistas y directores de obras de edificación. Se trata por tanto de normas y directrices con diferente grado de concreción, pero en cualquier caso vinculantes. Distinguimos tres niveles en función de su ámbito de aplicación: estatal, europeo e internacional.

2.2.1 Normativa estatal

La normativa española en materia de eficiencia energética en edificios se caracteriza por contar con un marco específico denominado *Código Técnico de la Edificación* (CTE), que resulta de obligado cumplimiento, independientemente de la capacidad regulatoria que en su caso puedan ejercer las comunidades autónomas dentro del marco jurídico que regula su estatuto.

Históricamente, la primera referencia normativa que se ocupa de regular aspectos relacionados con el consumo de energía en los edificios proviene del Decreto 1490/1975 [73]; donde ya se apuntan, aunque de manera muy sucinta, referencias al concepto de coeficiente de transmisión térmica del edificio (K_G), su factor de forma, el grado de permeabilidad al aire de las carpinterías y los tipos básicos de instalaciones generadoras de calor. Cuatro años más tarde se publica la primera norma española moderna que regula aspectos del consumo de energía en los edificios: es la denominada *Norma Básica de Edificación de Condiciones Térmicas en los edificios* (NBE-CT-79), del año 1979 [74]. En ella se desarrolla el método básico de cálculo de K_G, poco más que enunciado en el decreto de 1975, y se incluye un análisis para evitar condensaciones intersticiales en el cerramiento. Nada se avanza en relación a las instalaciones del edificio, ni a cómo reducir su contribución al consumo energético del mismo.

Durante casi tres décadas, esta norma de carácter tan elemental ha sido la única de aplicación en España en materia de eficiencia energética en edificios; lo que nos da una idea de lo relativamente novedoso que resulta este concepto, a pesar de lo mucho que se está hablando sobre el tema en los últimos diez años.

No es hasta 2006 que la NBE-CT-79 queda derogada con la emisión del Real Decreto 314/2006 [75], por el que se aprueba el CTE en su primera versión. En concreto nos estamos refiriendo al *Documento básico de ahorro de energía* (CTE-DB-HE), que por primera vez establecía las denominadas *exigencias básicas* para el ahorro de energía:

HE1 *Limitación de la demanda energética.*

HE2 *Rendimiento de las instalaciones térmicas.*

HE3 *Eficiencia energética de las instalaciones de iluminación.*

HE4 *Contribución solar mínima de agua caliente sanitaria.*

HE5 *Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica.*

Se trata, por tanto, de la primera norma que exige un análisis integral del comportamiento energético del edificio distinguiendo envolvente térmica y sistemas: HVAC, iluminación, ACS y placas solares fotovoltaicas (PV). Poco y mal se regula, en cambio, en relación a otros aspectos

importantes como la estanqueidad al aire, la eliminación de puentes térmicos, los sistemas de instrumentación y el análisis de datos operativos para la mejora de la eficiencia energética del edificio construido.
Poco menos de un año más tarde, el Real Decreto 47/2007 [76], complemento de la norma anterior, aprueba el primer *procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios*, trasponiendo parcialmente la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo [77], en lo relativo a la certificación de eficiencia energética de edificios. El Real Decreto 47/2007 refunde por tanto el Real Decreto 314/2006 o CTE original, con la incorporación de un procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios existentes.

En él se establece el procedimiento básico que debe cumplir la metodología de cálculo de la calificación de eficiencia energética, considerando aquellos factores que más incidencia tienen en su consumo energético, así como las condiciones técnicas y administrativas para las certificaciones de eficiencia energética de los edificios.

Cinco años más tarde, en cumplimiento de la directiva europea que obliga a revisar cada lustro la normativa en los países miembros; el Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, transpone parcialmente la Directiva 2010/31/UE en lo relativo a la certificación de eficiencia energética de edificios, e introduce nuevos procedimientos básicos para la certificación de la eficiencia energética de edificios nuevos y existentes. El Real Decreto 235/2013 refunde, por tanto, el Real Decreto 47/2007 con la incorporación de un nuevo procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios existentes, teniendo en consideración además la experiencia de su aplicación en los últimos cinco años. Se trata, por tanto, del documento normativo de ámbito nacional que se encuentra actualmente en vigor en la fecha de realización de este trabajo.

El Real Decreto 235/2013 actualiza el procedimiento básico que debe cumplir la metodología de cálculo de la calificación de eficiencia energética, considerando aquellos factores que más incidencia tienen en su consumo energético, así como las condiciones técnicas y administrativas para las certificaciones de eficiencia energética de los edificios. Este nuevo procedimiento deroga el establecido por el anterior Real Decreto 47/2007.

El Real Decreto 235/2013 también regula la utilización del distintivo común en todo el territorio nacional denominado *etiqueta de eficiencia energética*, garantizando en todo caso las especificidades que sean precisas en las distintas comunidades autónomas. En el caso de los edificios que presten servicios públicos a un número importante de personas, fija como obligatoria la exhibición de este distintivo de forma destacada.

Aparece en su disposición adicional segunda, y por primera vez en la normativa española, el concepto de nZEB, condicionando a que todos los edificios nuevos que se construyan a partir del 31 de diciembre de 2020 deberán ser tales. Igualmente, todos los edificios nuevos cuya construcción se inicie a partir del 31 de diciembre de 2018 que vayan a estar ocupados y sean de titularidad pública, deberán ser nZEB. Si embargo, no llega más allá en su definición de lo que se entiende normativamente como nZEB, dejando por el momento el concepto deliberadamente indefinido. Únicamente se remite al CTE para que en una próxima revisión de su texto se ocupe de definir los requisitos mínimos que deberán satisfacer estos edificios.

2.2.2 Normativa UE

A diferencia de la normativa estatal, la normativa de la UE se formaliza en base a *Directivas europeas*, que de alguna manera indican el camino a seguir por todos los países miembros en la transposición de cada directiva a su marco regulatorio específico. Las consecuencias del incumplimiento de estas directivas por los Estados miembros pueden acarrear importantes multas, pero no vinculan directamente a los técnicos responsables de la redacción de los proyectos de edificación.

La primera norma europea moderna relativa a la eficiencia energética de los edificios es la Directiva 2002/91/CE del Parlamento europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 [78]. El

objetivo de esta Directiva es fomentar la eficiencia energética de los edificios de la zona UE, teniendo en cuenta las condiciones climáticas exteriores y las particularidades locales, así como los requisitos ambientales interiores y la relación coste-eficacia.

Esta directiva determina que los Estados miembros aplicarán, a escala nacional o regional, una metodología de cálculo de la eficiencia energética de los edificios, cuyo marco general se expone en el Anexo I final. Igualmente determina que los Estados miembros tomarán las medidas necesarias para garantizar que se establezcan unos requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios. Estos requisitos serán revisados periódicamente en intervalos no superiores a 5 años y, en caso necesario, actualizados con el fin de adaptarlos a los avances técnicos del sector de la construcción.

Casi ocho años más tarde se aprueba la Directiva 2010/31/UE del Parlamento europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 [77], relativa a la eficiencia energética de los edificios. Se trata de un texto actualizado y refundido de la directiva de 2002. El objetivo de esta nueva directiva es fomentar la eficiencia energética de los edificios de la zona UE, teniendo en cuenta las condiciones climáticas exteriores y las particularidades locales, así como las exigencias ambientales interiores y la rentabilidad en términos coste-eficacia. Nada ha cambiado, por tanto, en el objetivo inicial, más allá del estado del conocimiento y las nuevas técnicas disponibles al servicio de la reducción del consumo de energía en los edificios. Mucho se ha investigado desde 2002 en este campo, por lo que existe un gran margen de mejora.

La primera gran novedad la encontramos en el Art. 9 de esta nueva directiva, donde aparece por primera vez el concepto de nZEB. Se fijan los plazos máximos del 31 de diciembre de 2020 para que todos los edificios nuevos sean nZEB, y del 31 de diciembre de 2018 para que los edificios nuevos que estén ocupados y sean propiedad de autoridades públicas sean nZEB.

La Directiva 2010/31/UE establece la obligatoriedad para los Estados miembros de elaborar planes nacionales destinados a aumentar el número de nZEB. Los planes nacionales incluirán la definición detallada por el Estado miembro del concepto de nZEB, de manera que se reflejen sus condiciones nacionales, regionales o locales y se incluya un indicador numérico de uso de energía primaria expresado en kWh/m^2 al año. Igualmente, abre la puerta a que estos planes nacionales puedan incluir objetivos diferenciados de acuerdo con la categoría del edificio.

La Directiva 2010/31/UE establece la obligatoriedad para la Comisión de publicar, el 31 de diciembre de 2012 a más tardar y cada tres años después de esa fecha, un informe sobre los avances efectuados por los Estados miembros a la hora de aumentar el número de nZEB. Sobre la base de ese informe, la Comisión elaborará un plan de acción y, si fuera necesario, propondrá medidas para aumentar el número de este tipo de edificios y fomentará las mejores prácticas en materia de transformación rentable de edificios existentes en nZEB.

Finalmente, la Directiva 2010/31/UE actualiza el Anexo I, referido en el anterior decreto de 2002, para adaptarlo al progreso de la técnica, incluyendo otros nuevos más específicos.

Dos años más tarde, el 14 de noviembre de 2012, se produce una nueva actualización de la normativa europea relativa a la eficiencia energética con la publicación en el Diario Oficial de la Unión Europea de la Directiva 2012/27/UE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012 [1].

Esta nueva directiva surge en un marco en el que se constata que, a pesar de todos los esfuerzos y las buenas intenciones desplegadas, la UE difícilmente va a alcanzar el objetivo de aumentar en un 20% la eficiencia energética en 2020. En este contexto se decide actualizar el marco legal de la Unión en materia de eficiencia energética, mediante una directiva que no sólo refuerce dicho objetivo, sino que también favorezca que las nuevas mejoras de eficiencia energética vayan más allá del 2020.

La Directiva 2012/27/UE complementa a la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de edificios, en lo referente a la

función ejemplarizante de los edificios de los organismos públicos.

2.2.3 Normativa internacional

El 12 de agosto de 2015, la Asamblea general de las Naciones Unidas aprueba el documento A/69/L.85, denominado *Proyecto de documento final de la cumbre de las Naciones Unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015* [79]. Este documento resume la aplicación y seguimiento integrados y coordinados de los resultados de las grandes conferencias y cumbres de las Naciones Unidas en las esferas económica y social y esferas conexas (seguimiento de los resultados de la *Cumbre del Milenio*), e incluye los denominados *Objetivos de desarrollo del milenio* (ODM).

Los ODM son en total 17, de los cuales destacamos dos por su relación con los objetivos de este trabajo de investigación:

> *Objetivo 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.*

Y en concreto:

> *11.c Proporcionar apoyo a los países menos avanzados, incluso mediante asistencia financiera y técnica, para que puedan construir edificios sostenibles y resilientes utilizando materiales locales.*
>
> *Objetivo 13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.*

Y en concreto:

> *13.2 Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.*

Por otra parte, La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), incorporó una línea muy importante de uno de los tratados multilaterales sobre medio ambiente que más éxito han tenido en toda la historia: el *Protocolo de Montreal* de 1987 [80], en virtud del cual los estados miembros están obligados a actuar en interés de la seguridad humana, incluso a falta de certeza científica.

Un logro importante de esta convención, de carácter general y flexible, es que reconoce que el problema del cambio climático es real. La entrada en vigor del tratado representó un gran paso, dado que se disponía de menos pruebas científicas que hoy en día (aunque todavía haya quienes duden de que el cambio climático sea un hecho incontestable). Es difícil conseguir que las naciones del mundo se pongan de acuerdo en algo, mucho menos en un planteamiento común ante una dificultad que es compleja, cuyas consecuencias no son totalmente claras y que producirá sus efectos más graves dentro de varios decenios, e incluso siglos.

La CMNUCC entró en vigor el 21 de marzo de 1994. Hoy en día cuenta con un número de miembros que la hace casi universal. Las denominadas *partes en la convención* son las 197 partes que la han ratificado. La Convención reconoce que es un documento *marco*, es decir, un texto que debe enmendarse o desarrollarse con el tiempo para que los esfuerzos frente al calentamiento atmosférico y el cambio climático puedan orientarse mejor y ser más eficaces. La primera adición al tratado, el *Protocolo de Kyoto*, se aprobó en 1997 [81].

En 1988 se creó el *Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático* (IPCC), por iniciativa de la *Organización Meteorológica Mundial* y el *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente* (PNUMA). En 1990 este grupo presentó un primer informe de evaluación en el que se reflejaban las investigaciones de cuatrocientos científicos [82]. En él se afirmaba que el calentamiento atmosférico de la Tierra era real y se pedía a la comunidad internacional que tomara cartas en el asunto para evitarlo.

Las conclusiones del IPCC alentaron a los gobiernos a aprobar la CMNUCC. En comparación con lo que suele ocurrir con los acuerdos internacionales, la negociación en este caso fue rápida. La Convención estaba lista para firmar en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el

Desarrollo que se celebró en 1992 en Río de Janeiro, conocida como Cumbre para la Tierra.

Hoy en día, el IPCC tiene una función claramente establecida. En vez de realizar sus propias investigaciones científicas, examina las investigaciones realizadas en todo el mundo, publica informes periódicos de evaluación (hasta ahora han sido cuatro), y elabora informes especiales y documentos técnicos.

2.3 LOS SISTEMAS DE CERTIFICACIÓN VOLUNTARIOS

Se entiende por sistemas de certificación voluntarios aquellos que, independientemente del marco regulatorio de carácter obligatorio en cada país o región, van más allá de los requisitos de obligado cumplimiento, avanzando en la reducción del consumo energético del edificio.

La mayoría de los sistemas de certificación voluntarios no se limitan únicamente a analizar el consumo energético del edificio, sino que evalúan aspectos globales de la sostenibilidad en la construcción, como el tratamiento de residuos, el análisis de ciclo de vida, el ahorro de agua, la accesibilidad y el transporte, etc. Estos sistemas de certificación están promovidos por corporaciones, asociaciones de profesionales, centros de investigación, organizaciones no gubernamentales, etc.

Existen multitud de sellos de certificación voluntarios que de una u otra manera entran a analizar el consumo energético de los edificios, si bien por su popularidad y nivel de implantación global analizaremos Passivhaus, LEED, BREEAM, 3-STAR y otros como DGNB y HQE.

2.3.1 Passivhaus

El Instituto Passivhaus (PHI) impulsor de la certificación que lleva su nombre, tiene su sede en Darmstadt, cerca de Fráncfort (Alemania). La primera *passivhaus* certificada data de 1990. Se trata de una certificación con origen y gran implantación en Alemania y Austria, si bien en los últimos años están proliferando asociaciones nacionales en multitud de países como la Plataforma Española Passivhaus (PEP). Tiene muchas similitudes con el sello *Minergie*, de gran implantación en Suiza.

Passivhaus es un sistema de certificación orientado, en un principio, para viviendas en clima frío; si bien es verdad que en los últimos años se está diversificando para abarcar otras tipologías (docente, administrativo, etc.) y otros climas (mediterráneo, cálido, etc.).

Para que un edificio sea considerado una casa pasiva, debe cumplir los siguientes criterios:

1. La Demanda de energía de calefacción no debe exceder los 15 kWh por metro cuadrado de espacio habitable neto (área de suelo tratada) por año, o 10 W por metro cuadrado de demanda máxima. En climas donde se necesita enfriamiento activo, el requerimiento de demanda de energía de enfriamiento se ajusta aproximadamente a los requerimientos de demanda de 10 W por metro cuadrado, con una tolerancia adicional para la deshumidificación.

2. La demanda de energía primaria total, la energía total que se utilizará para todas las aplicaciones domésticas, no debe exceder los 120 kWh por metro cuadrado de superficie tratada al año, para la casa pasiva clásica.

3. En términos de hermeticidad, resulta admisible un máximo de 0,6 renovaciones de aire por hora a 50 Pascales de depresión y de sobrepresión, verificado con una prueba de BDT *in situ* [83].

4. El confort térmico debe ser alcanzado para todas las áreas vivideras durante el invierno así como en verano, con no más del 10% de las horas en un año con sobrecalentamiento.

Los edificios de viviendas pasivas se planifican, optimizan y verifican con el *Paquete de Planificación de la Casa Pasiva* (PHPP). Se trata de una aplicación informática de

simulación energética del edificio de tipo estático.

Para conseguir cumplir los criterios anteriores es necesario la implementación de los cinco principios básicos de la Casa Pasiva: eliminación completa de puentes térmicos en la envolvente exterior, ventanas de calidad superior con muy baja transmitancia térmica (*U-Value*), ventilación de doble flujo con recuperación de calor, cerramiento de muy baja *U-Value* con aislamiento de calidad y construcción muy hermética que reduzca al mínimo las infiltraciones incontroladas de aire exterior.

W/m²K o inferior. Es decir: se pierden un máximo de 0,15 vatios por grado de diferencia de temperatura y por metro cuadrado de superficie exterior.

2. Ventanas de altas prestaciones: Los marcos de las ventanas deben estar muy bien aislados y estar provistos de acristalamientos de baja transmitancia térmica rellenos de argón o criptón para evitar la transferencia de calor. Para la mayoría de los climas fríos, esto significa un valor *U-Value* de 0,80 W/m²K o inferior, con valores de g alrededor del 50% (valor g = transmitancia solar total, proporción de la

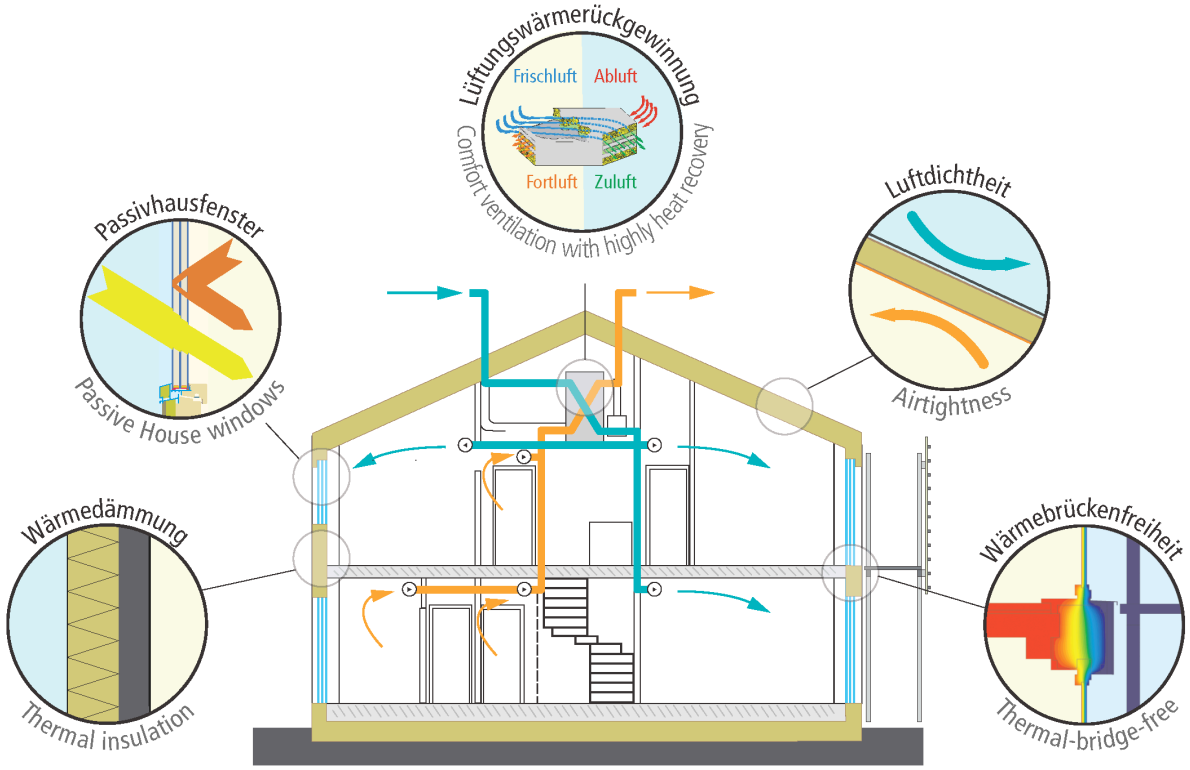


Figura 2.3: Principios básicos de la certificación *Passivhaus* (Fuente: PHI)

La figura 2.3 ejemplifica los principios básicos para la construcción de viviendas pasivas. En concreto:

1. Aislamiento térmico: Todos los componentes opacos de la envolvente exterior del edificio deben estar muy bien aislados. Para la mayoría de los climas de temperatura fría, esto significa un coeficiente de transmitancia térmica (*U-Value*) de 0,15

energía solar disponible para la habitación).

3. Recuperación de calor por ventilación: La ventilación VMRC de alta eficiencia es imprescindible, asegurando una buena calidad del aire interior y ahorrando energía. En una *passivhaus*, al menos el 75% del calor del aire de extracción viciado se transfiere al aire fresco de impulsión por medio de un intercambiador de calor.

4. Hermeticidad del edificio: Las fugas incontroladas a través de los huecos deben ser inferiores a 0,6 del volumen total de la casa por hora durante un BDT a 50 Pascales (presurizada y despresurizada).

5. Ausencia de puentes térmicos: Todos los bordes, esquinas, conexiones y penetraciones deben ser planificados y ejecutados con mucho cuidado, para evitar puentes térmicos. Los puentes térmicos que no pueden evitarse, deben minimizarse en la medida de lo posible.

2.3.2 LEED

LEED es el acrónimo de *Leadership in Energy & Environmental Design* (Directiva de diseño energético y medioambiental). Es el sistema de certificación de edificios sostenibles de mayor implantación a nivel mundial, y está desarrollado por el *US Green Building Council* (USGBC). LEED v4 es la versión actualizada del certificado LEED clásico [84].

Se trata de una certificación de uso voluntario, con un enfoque global medioambiental, cuya primera versión data de 1998. Se basa en la incorporación en el proyecto de aspectos relacionados con la eficiencia energética, el uso de energías alternativas, la mejora de la calidad ambiental interior, la eficiencia del consumo de agua, el desarrollo sostenible de los espacios libres de la parcela y la selección de materiales.

LEED no es, como Passivhaus, una certificación todo/nada; sino que está basada en un sistema de puntos que permiten alcanzar un determinado nivel de certificación. La puntuación total se establece sobre una base máxima de 100 puntos. Los cuatro niveles de certificación disponibles son: *LEED Certificate* (40 a 49 puntos), *LEED Silver* (50 a 59 puntos), *LEED Gold* (60 a 79 puntos) y *LEED Platinum* (80 o más puntos).

Los puntos se obtienen por alcanzar niveles de excelencia en cada una de las cinco categorías de evaluación. Estas cinco categorías de evaluación son: SS (lugares sostenibles), WE (uso eficiente del agua), EA (energía y atmósfera), MR (materiales y recursos) e IEQ (calidad del ambiente interior), además de 6 posibles puntos por Innovación en el diseño y 4 posibles puntos por Prioridad regional.

Existen pequeñas diferencias por países, pero en general, las categorías de evaluación en LEED son las siguientes:

1. Ubicación y Transporte: Propone evitar el desarrollo en sitios no apropiados. Reducir la distancia de desplazamiento de vehículos. Promover la habitabilidad y mejorar la salud humana mediante el fomento de la actividad física diaria.

2. Lugares sostenibles: Aboga principalmente por definir correctos criterios de emplazamiento de los proyectos, por la revitalización de terrenos subutilizados o abandonados, la conectividad o cercanía al transporte público, la protección o restauración del hábitat y el adecuado manejo y control de aguas de lluvia en el terreno seleccionado.

3. Uso eficiente del agua: Nos incentiva a utilizar el recurso agua de la manera más eficiente, a través de la disminución del agua de riego, la adecuada selección de especies y la utilización de artefactos sanitarios de bajo consumo.

4. Energía y Atmósfera: Es necesario cumplir con los requerimientos mínimos del *Standard* ASHRAE 90.1-2007 [85] para un uso eficiente de la energía que utilizamos en nuestros proyectos. Para esto se debe demostrar un porcentaje de ahorro energético en comparación con un caso base que cumple con el estándar. Además, se debe asegurar en esta categoría un adecuado comportamiento de los sistemas del edificio a largo plazo.

5. Materiales y Recursos: Describe los parámetros que un edificio sostenible debe considerar en torno a la selección de sus materiales. Se premia en esta categoría que los materiales utilizados sean regionales, reciclados, rápidamente renovables y/o certificados con algún sello verde, como por ejemplo una Declaración ambiental de

producto verificada conforme a las Normas UNE-EN ISO 14025 [86] y UNE-EN 15804 [87], entre otros requisitos.

6. Calidad del ambiente interior: Describe los parámetros necesarios para proporcionar un adecuado ambiente interior en los edificios, una adecuada ventilación, confort térmico y acústico, el control de contaminantes al ambiente y correctos niveles de iluminación para los usuarios.

7. Innovación en el diseño: Los créditos frente a la experiencia de construcción sostenible, así como medidas de diseño que no están cubiertos bajo las cinco categorías de crédito LEED.

8. Prioridad regional: Se reconoce la importancia de las condiciones locales en la determinación de las mejores prácticas de construcción y diseño ambientales.

El proceso de certificación se realiza con la asistencia de empresas consultoras que actúan asesorando al equipo redactor del proyecto. Su función no es la de actuar como certificadores ni como revisores, ya que el único organismo facultado para otorgar la certificación LEED es el USGBC en Estados Unidos. El servicio de certificación se realiza completamente en línea, a través de la página web del USGBC [88]. La empresa consultora documenta la información necesaria y la sube a la red.

Las tipologías reconocidas LEED son:

1. Obra nueva y Construcción sostenible (*Green Building Design & Construction*).

LEED para obra nueva (*New Construction*).
LEED para núcleo y envolvente (*Core & Shell*).
LEED para uso docente (*Schools*).
LEED para uso comercial (*Retail: New Construction and Major Renovations*).
LEED para uso hospitalario (*Healthcare*).

2. Reforma integral y Construcción sostenible (*Green Interior Design & Construction*).

LEED para la reforma de grandes comerciales (*Commercial Interiors*).
LEED para la reforma de pequeños comerciales (*Commercial Interiors*).
3. Operación y Mantenimiento sostenible (*Green Building Operations & Maintenance*).

LEED para edificios existentes (*Existing Buildings: Operations & Maintenance*).

4. Desarrollo de barrios sostenibles (*Green Neighborhood Development*).

LEED para barrios sostenibles (*Neighborhood Development*).

5. Vivienda y Construcción sostenible (*Green Home Design and Construction*).

LEED para uso residencial (*Homes*).

Las categorías de impacto desarrolladas para LEED v4 subrayan cómo un proyecto puede beneficiar a sus comunidades locales y a nuestro planeta en general. Incentivan la búsqueda de créditos de mayor valor y mayores niveles de certificación que logren mejores impactos ambientales económicos y sociales:

1. Pensamiento integral (*Integrative thinking*)

Llevar a las personas adecuadas a la mesa inicial de reuniones y alinear las metas puede ahorrar a los equipos de proyecto un valioso tiempo y recursos.

Los requisitos en la sección del Proceso Integrativo (IP) fomentan y premian la búsqueda de conexiones entre los diferentes sistemas y procesos del edificio. Las estrategias incorporadas en LEED a menudo logran algo más que una cosa, y con este diálogo de apertura, los proyectos pueden aprovechar esas sinergias.

2. Energía (*Energy*)

Comenzando con un enfoque en la reducción de la demanda de energía a través de orientaciones relacionadas con el uso de la energía y la eficiencia, y luego recompensar las energías renovables, LEED eleva la barra de la energía y ofrece nuevas soluciones para alcanzar los objetivos.

Dentro de la sección de Energía y Atmósfera (EA), los equipos encontrarán:
Un 20% de todos los puntos asignados a la eficiencia energética del edificio. LEED tiene un mayor énfasis en la energía y los impactos asociados. Énfasis en la mejora de la puesta en marcha de edificios para una mayor eficiencia energética y operativa. Beneficios del pensamiento de la red inteligente a través de una opción que recompensa los proyectos por participar en programas de respuesta a la demanda.

3. Agua (*Water*)

Cada sistema en un edificio se ve afectado por el agua. Se conecta e interactúa con todo. Sólo en los Estados Unidos, el consumo en los edificios representa el 13,6 por ciento del uso de agua potable.

La sección de Eficiencia de Agua (WE) en la versión más reciente de LEED aborda el agua de manera holística, teniendo en cuenta su uso en interiores, su uso en exteriores, y usos especializados. Mide todas las fuentes de agua relacionadas con un edificio, incluyendo torres de refrigeración, electrodomésticos, accesorios, agua de proceso e irrigación.

La medición de agua a nivel de todo el edificio asegura que los proyectos pueden monitorear y controlar su uso con el fin de identificar oportunidades de ahorro de agua. LEED v4 también promueve proyectos para reutilizar agua, incluyendo aguas residuales, aguas grises, condensados, agua de proceso y agua de lluvia, para riego, descarga de retretes y más.

4. Residuos (*Waste*)

En su jerarquía de gestión de residuos sólidos, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, siglas en inglés) clasifica la reducción, la reutilización, el reciclaje y la eliminación de residuos como las cuatro estrategias preferidas para reducir los residuos.

La sección de Materiales y Recursos (MR) dentro de LEED v4 aborda directamente cada una de estas estrategias recomendadas que han sido reestructuradas y re-priorizadas de sus créditos originales en LEED 2009.

5. Materiales (*Materials*)

LEED cambia el paradigma de cómo se toman las decisiones acerca de los materiales que entran en los edificios en los que pasamos tanto tiempo, dando nueva información relevante a los tomadores de decisiones.

Uso: Dentro de la sección Materiales y Recursos (MR), en lugar de decir que un producto es bueno o malo basado en un atributo, LEED permite a los equipos de proyecto tener un diálogo más sólido con los fabricantes sobre la optimización de los impactos ambientales, sociales y de salud. Esta categoría está diseñada para considerar todo el ciclo de vida del edificio, desde la extracción y la fabricación, hasta el transporte, las operaciones y el mantenimiento y, finalmente, el final de la vida.

Ciclo de vida: Toda la evaluación del ciclo de vida del edificio alienta al arquitecto a trabajar con el ingeniero estructural, para investigar las oportunidades de reducir la energía incorporada de los materiales mediante el dimensionado correcto de la estructura del edificio. Puede haber tanto como un 20-30% de impacto positivo en el ciclo de vida del edificio variando el tamaño de la viga y el canto de la losa. Esto es importante porque a medida que los edificios se vuelven más eficientes desde el punto de vista operacional, el impacto incorporado de los materiales aumenta proporcionalmente.

Transparencia: Las declaraciones medioambientales de productos y las herramientas de reporte de componentes de los materiales, así como las declaraciones de productos de salud, proporcionan a los arquitectos y diseñadores más información sobre el contenido de los productos y el proceso de fabricación. Al proporcionar esta información, los fabricantes pueden diferenciar mejor el progreso que han hecho y demostrar esa mejora.

6. Ubicación y transporte (*Location and transportation*)

El primer paso hacia el objetivo de mejora ambiental es escoger una buena ubicación. Para los propietarios, la proximidad a los servicios existentes y al casco urbano es fundamental. La localización en comunidades habitables hace que el edificio sea un destino adecuado para los residentes, empleados, clientes y visitantes, y permite que los ocupantes del edificio contribuyan a la actividad económica del área, creando un buen modelo para el desarrollo futuro.

Una nueva sección desarrollada para LEED v4, Ubicación y Transporte (LT), incluye énfasis en métricas de desempeño más avanzadas - distancia a pie en lugar de radio de línea recta, recuento de viajes en lugar de paradas de tránsito, requisitos de estacionamiento absoluto y no relativo, y redes de bicicletas además de almacenamiento de bicicletas.

7. Sitios sostenibles (*Sustainable sites*)

El impacto de un edificio no se limita a lo que hay dentro de él. Las estrategias en relación a los sitios sostenibles (SS) abordan los impactos al recompensar las decisiones sobre el entorno que rodea el edificio y enfatizan las relaciones vitales entre los edificios, los ecosistemas y los servicios de los ecosistemas. Se centran en la restauración de los elementos del entorno del proyecto, la integración del sitio con los ecosistemas locales y regionales, y la preservación de la biodiversidad en la que se basan los sistemas naturales.

8. Salud y experiencia humana (*Health and human experience*)

Los edificios y espacios con buena calidad ambiental interior protegen la salud y la calidad de vida de los ocupantes del edificio. Dando un paso más allá, los ambientes interiores de alta calidad también trabajan para mejorar el valor del edificio, mejorar la productividad, disminuir el absentismo y reducir la responsabilidad de los diseñadores y propietarios de edificios.

9. Impactos regionales (*Regional impacts*)

Debido a que algunos problemas ambientales son específicos de una localidad, LEED identifica distintas prioridades ambientales por área. Los equipos de proyecto son recompensados por perseguir y lograr créditos LEED existentes que abordan temas específicos de la ubicación de sus proyectos.

Los créditos de Prioridad Regional (RP) alientan a los equipos del proyecto a concentrarse en sus prioridades ambientales locales y hay seis créditos LEED v4 para cada ubicación.

10. Innovación (*Innovation*)

Las estrategias y medidas de diseño sostenible evolucionan y mejoran constantemente. Las nuevas tecnologías se introducen continuamente en el mercado, y la investigación científica actualizada influye en las estrategias de diseño de edificios.

El objetivo de la categoría de Innovación (IN) es reconocer proyectos de características innovadoras y prácticas en edificios y así como estrategias de construcción sostenible.

11. Global, Regional, Local (*Global, regional, local*)

LEED se ha convertido en un lenguaje común de las mejores prácticas en edificios de todo el mundo. En el sistema de calificación LEED V4, se presta un mayor reconocimiento al contexto regional con la incorporación de estándares y equivalentes regionales y locales, utilizables para lograr la misma puntuación posible.

Las unidades métricas se han incluido en todas las herramientas y recursos.

2.3.3 BREEAM

BREEAM es el acrónimo de Investigación en Edificación para el establecimiento de una metodología medioambiental (*Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology*).

BREEAM evalúa impactos ambientales en edificación distinguiendo diez categorías específicas: Gestión, Salud y Bienestar, Energía, Transporte, Agua, Materiales, Residuos, Uso ecológico del suelo, Contaminación, Innovación. Otorga una puntuación final tras aplicar un factor de

ponderación ambiental que tiene en cuenta la importancia relativa de cada área de impacto.

BREEAM abarca las distintas fases de diseño, construcción y uso del edificio, y dispone de esquemas de evaluación y certificación en función de su tipología y uso específico.

Presente en el Reino Unido desde 1990, el enorme incremento de la demanda de certificación de sostenibilidad de edificios a nivel global dio lugar a la aparición en el año 2008 del esquema de certificación BREEAM International, aplicable a edificios fuera del Reino Unido. Este esquema permite cierto margen de adaptación a la normativa local de cada país.

Incluye varios estándares de técnicos:

1. Comunidades (*Communities*)

Es una ruta sencilla y flexible para mejorar, medir y certificar la sostenibilidad de los planes de desarrollo a gran escala. Proporciona un marco para apoyar a los planificadores, autoridades locales, desarrolladores e inversores a través del proceso de planificación territorial, antes de embarcarse en la adquisición, diseño detallado del edificio y construcción. Pensado para desarrollos de mediana a gran escala, incluyendo nuevas comunidades y proyectos de regeneración.

2. Infraestructuras (*Infrastructure*)

Es un método de evaluación basado en el esquema de certificación para nuevos activos de infraestructuras. Su objetivo es mitigar los impactos del ciclo de vida de los nuevos activos de infraestructuras en el medio ambiente y mejorar los impactos sociales y económicos positivos.

La metodología puede ser integrada en el proceso de diseño y construcción por los clientes y sus equipos de proyecto para influir en decisiones clave en el proyecto. También permite al cliente medir, evaluar y reflejar el rendimiento de su nuevo activo de infraestructuras frente a las mejores prácticas existentes. El *BREEAM Infrastructure Assessor* y el proceso de certificación *BRE Global* proporcionan independencia y solidez a la evaluación.

3. Obra nueva (*New Construction*)

Evalúa el diseño, la construcción, el uso previsto y el futuro de los nuevos edificios, incluyendo el entorno local, natural o artificial que lo rodea. Utiliza un marco común que es adaptable, dependiendo del tipo y la localización del edificio.

4. En uso (*In-use*)

Es un método de evaluación que ayuda a los inversores inmobiliarios, propietarios, gerentes y ocupantes a impulsar mejoras sostenibles a través de la eficiencia operativa, incluyendo cómo gestionar continuamente el funcionamiento de su edificio de manera efectiva.

5. Reforma y acondicionamiento (*Refurbishment and Fit-out*)

Esta norma permite a los inversores inmobiliarios, promotores y propietarios de edificios evaluar y mitigar los daños ambientales innecesarios causados mientras se completa un proyecto de renovación o acondicionamiento. Tras el proceso de evaluación, se otorga un certificado que reconoce el rendimiento ambiental del edificio una vez que se hayan realizado mejoras en el exterior, la estructura, los servicios básicos, los servicios locales o el diseño interior de un edificio.

2.3.4 3-STAR GBEL

En la actualidad existen en China dos programas nacionales de etiquetado energético de edificios: el Programa de Evaluación y Etiquetado de Edificios Verdes (GBEL) y el Programa de Evaluación y Etiquetado de Eficiencia Energética de Edificios (BEEL).

El GBEL fue establecido por el Ministerio de Vivienda y Desarrollo Urbano-Rural (MOHURD) del Gobierno Chino en 2008. Incluye dos estándares de evaluación diferentes para edificios residenciales y de pública concurrencia.

El programa GBEL es voluntario, y consta de un *Green Building Design Label* (GBDL) y el *Green Building Label* (GBL). Ambas etiquetas utilizan un sistema de calificación con un nivel máximo de tres estrellas, que se otorgan a los edificios ecológicos de mayor calificación y un mínimo de una estrella, otorgada a los edificios ecológicos de menor calificación.

El GBDL da soporte a la precertificación de un edificio verde, es válido por dos años y otorga al diseño del edificio de una a tres estrellas de acuerdo con la Norma de Evaluación del Edificio Verde. El sistema de evaluación GBDL se compone de tres tipos de criterios para cada una de las seis categorías evaluadas: elementos obligatorios que deben incluirse en el edificio, elementos generales y elementos preferidos. Se otorga un punto por cada elemento que se incluye en el diseño del edificio.

Por ejemplo, los elementos obligatorios de eficiencia energética para edificios residenciales incluyen cumplir con los requisitos estándar de ahorro de energía para el diseño de calefacción y aire acondicionado, instalar termostatos y controles de temperatura en edificios que tienen calefacción central o aire acondicionado. Los elementos generales de eficiencia energética incluyen el uso de equipos altamente eficientes en sistemas de iluminación, unidades de recuperación de energía y tecnologías de energía renovable tales como calentadores de agua solares, energía solar fotovoltaica (PV) y sistemas de bombas de calor de geotermia. Los elementos preferidos incluyen una calefacción y un aire acondicionado más eficientes y una mayor integración de las energías renovables.

La calificación final de la etiqueta en número de estrellas se determina por la puntuación mínima para cada uno de los seis componentes, no la puntuación total. Por lo tanto, un edificio debe cumplir un número mínimo de requisitos en las seis categorías.

En esencia, un edificio ecológico de tres estrellas debe sobresalir en los seis componentes de evaluación, incluyendo los elementos preferidos. La figura 2.4 muestra los requisitos mínimos y los sistemas de evaluación de la calificación de los edificios residenciales y de pública concurrencia, respectivamente.

El GBL es la versión del certificado GBDL para el edificio terminado. Supone por tanto una evaluación más completa de los edificios verdes precertificados por el GBDL, ya que también considera el control de calidad durante el proceso de construcción y operación. El GBL puede ser otorgado sólo después de un mínimo de un año de operación desde la finalización de las obras de construcción y es válido por tres años. El proceso de evaluación de GBL también requiere una visita in situ; documentación de

Criteria for Green Building Design Label rating evaluation for residential buildings

Rating Level	**Mandatory Items Included (27)**	**General Items**						**Preferred Items**
		Land Use & Outdoor Environment	Energy Efficiency	Water Efficiency	Resource Efficiency	Indoor Environment	Operational Management	
		Total: 8	*Total: 6*	*Total: 6*	*Total: 7*	*Total: 6*	*Total: 7*	*Total: 9*
★	Yes	4	2	3	3	2	4	0
★★	Yes	5	3	4	4	3	5	3
★★★	Yes	6	4	5	5	4	6	5

Source: MOHURD 2007

Criteria for Green Building Design Label rating evaluation for public buildings

Rating Level	**Mandatory Items Included (26)**	**General Items**						**Preferred Items**
		Land Use & Outdoor Environment	Energy Efficiency	Water Efficiency	Resource Efficiency	Indoor Environment	Operational Management	
		Total: 6	*Total:10*	*Total: 6*	*Total: 8*	*Total: 6*	*Total: 7*	*Total: 14*
★	Yes	3	4	3	5	3	4	0
★★	Yes	4	6	4	6	4	5	6
★★★	Yes	5	8	5	7	5	6	10

Source: MOHURD 2007

Figura 2.4: Principios básicos de la certificación *3 STAR* (Fuente: MOHURD)

materiales de construcción y sus fuentes; planes de manejo de propiedad para agua, energía y conservación de materiales; y los documentos financieros detallados, tales como facturas de cantidades. Sin embargo, no se requiere aportar datos de consumo de energía operacional real porque el GBL se enfoca principalmente en el diseño del edificio y la implementación exitosa del diseño en el proceso de construcción.

Aunque es un sistema de calificación nacional específico de China, el certificado GBEL ofrece cierta flexibilidad provincial porque las autoridades locales de evaluación y certificación tienen la potestad de eliminar ciertos elementos de la norma, los cuales pueden no ser compatibles con las condiciones geográficas o climáticas locales. Por ejemplo, en el municipio de Shenyang, en el noroeste de China, a todos los edificios públicos que buscan la certificación de edificios ecológicos se les requiere que consideren la posibilidad de utilizar una bomba de calor para calefacción. Este requisito sin embargo no está disponible ni es apropiado para otras regiones.

2.3.5 Otras certificaciones voluntarias

A continuación incluimos otros sistemas de certificación que, si bien no tienen el recorrido histórico ni el nivel de implantación de los anteriores, deben ser tenidos en cuenta por sus posibilidades de proyección a medio plazo.

2.3.5.1 German Sustainable Building Council (DGNB)

El DGNB, o Consejo Alemán de Construcciones Sostenibles (*Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen*) fue fundado en 2007 por dieciséis promotores de diversas áreas dentro del sector de la construcción y del inmobiliario. El objetivo era promover una construcción sostenible y económicamente eficiente aún más fuerte en el futuro.

El DGNB certifica el cumplimiento excepcional de hasta 50 criterios de sostenibilidad agrupados por secciones: calidad, ecología, economía, aspectos socioculturales, tecnología, flujos y procesos de trabajo y localización. El sistema se basa en superar voluntariamente los conceptos estrictamente normativos, así como aquellas soluciones que son usuales hoy en día. Con carácter previo, existe la opción de precertificación simple en la fase de planificación y proyecto. Si se cumple el requisito de calidad del edificio construido, la DGNB otorga el certificado DGNB en bronce, plata, oro y platino.

2.3.5.2 Haute Qualité Environnementale (HQE)

En Francia, HQE es administrado por un grupo de partes interesadas dentro de una reconocida organización de servicio público denominada HQE Association.

Existen tipos de certificación diferentes:

1. *Certivea* para la planificación local y edificios no residenciales que se están construyendo, renovando o utilizando.
2. *Cerqual* para Edificios residenciales, renovados o utilizados.
3. *Cequami* para casas unifamiliares.

La certificación HQE se basa en tres principios:

1. Los propietarios del proyecto establecen sus propios objetivos.
2. A priori no se impone ninguna solución arquitectónica o técnica específica, y el equipo del proyecto toma sus propias decisiones para adaptarlas a los requerimientos de la certificación.
3. El apoyo a la gestión del proyecto permite que todas las partes interesadas en el proyecto se involucren y contribuyan al cumplimiento de las metas establecidas.

2.3.6 Resumen de los sistemas de certificación voluntarios

La figura 2.5 presenta un resumen comparativo de los principales sistemas de certificación voluntaria de la eficiencia energética en edificios.

La primera característica que nos llama la atención es que la práctica totalidad de ellos están promovidos por asociaciones privadas,

algunos con y otros sin ánimo de lucro. Sólo TRI-STAR, es promovido por el gobierno Chino.

Destacar la importancia que en todos los sistemas de certificación se otorga a la supervisión de la documentación de proyecto (previa a la obra), así como y aunque no en la misma medida, al control que se realiza sobre la obra en ejecución y la ya ejecutada. Resulta llamativo sin embargo que en ningún caso se otorgue importancia significativa al control sobre la fase de operación del edificio.

Por último, es importante destacar el país de origen de cada una de estas certificaciones. En todos los casos se trata de países fuertemente industrializados, con clima predominantemente frío. Únicamente en el caso de los sistemas de certificación promovidos por los países de mayor extensión como USA y China, éstos incorporan adaptaciones para clima cálido (tropical y subtropical). Actualmente Passivhaus y BREEAM están trabajando también en sus respectivas adaptaciones para clima cálido.

	Passivhaus	LEED	BREEAM	TRI-STAR	DGNB	HQE
Promotor	PH Institute	USGB Council	BRE	MOHURD	GSB Council	HQE Association
Tipo	Research institute	ONG	Organización privada	Gobierno	Asociación Empresas	ONG
Control proyecto	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Control obra	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Control operación	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Análisis de datos	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Origen	Alemania	USA	UK	China	Alemania	Francia
Ámbito	Mundial	Mundial	Mundial	China	Alemania	Francia

Figura 2.5: Principales sistemas de certificación voluntaria. Estudio comparado

2.4 EDIFICIOS DE CONSUMO DE ENERGÍA MÍNIMA

Si hablamos de nueva edificación, la Directiva 2010/31/UE [77] y posterior actualización, Directiva (UE) 2012/27/UE [1], establecen la obligatoriedad para los estados miembros de elaborar planes nacionales destinados a aumentar el número de nZEB. Los planes nacionales deben incluir la definición detallada por el Estado miembro del concepto de nZEB, de tal modo que se reflejen sus condiciones nacionales, regionales o locales y se incluya un indicador numérico de uso de energía primaria expresado en kWh/m^2 al año.

Según el informe de la UE [89], en 2013 en España aún no se había formulado una definición precisa del concepto de nZEB. Todavía en 2017 sigue siendo una cuestión fundamental pendiente de resolver en nuestro país.

El Real Decreto 235/2013 [90], disposición adicional segunda, recogiendo lo indicado en la normativa europea, establece plazos máximos de construcción, pero incomprensiblemente evita especificar requisitos mínimos para la construcción de nZEB en España. En su lugar, este documento se limita a remitirnos a una futura revisión del CTE, que deberá fijar los requisitos mínimos a cumplir por los nZEB en España.

La respuesta del Ministerio de Fomento a la Directiva (UE) 2012/27/UE es que durante 2018 está previsto realizar una tercera revisión del Código Técnico de la Edificación, después de la última realizada en 2013 [91], y que en ella, por fin se incluirán los requisitos que debe cumplir un nZEB. No es hasta 2019 que se prevé aprobar una definición definitiva.

Resulta difícil entender en realidad a qué estamos esperando en nuestro país. Sobre todo teniendo en cuenta que según el propio Ministerio de Fomento [90], todos los edificios nuevos que vayan a estar ocupados y sean de titularidad pública, cuya construcción se inicie a partir del 31 de diciembre de 2018, serán nZEB. Considerando los plazos medios de tramitación y gestión de expedientes de licitaciones públicas en nuestro país según la Ley de Contratos del Estado [92] para la contratación de servicios de consultoría de redacción de proyectos y dirección de obras; a lo que hay que añadir los plazos de redacción del proyecto constructivo, los de supervisión técnica por la administración contratante, los de tramitación de la preceptiva licencia municipal de obra, y vuelta a empezar con la licitación de empresas constructoras; nos atrevemos a adelantar que el de diciembre de 2018 se trata de un compromiso improbable de ser cumplido. Por no decir imposible.

Por otra parte, todos los sistemas de certificación voluntaria expuestos en el punto anterior de este mismo capítulo, aportan de manera más o menos específica su propia lista de requisitos a cumplir por un nZEB. Resultaría del mayor interés para la mejora de la eficiencia energética de los edificios en España, y para el cumplimiento efectivo de los plazos antes referidos, avanzar cuanto antes en una propuesta concreta de definición de estos requisitos nZEB. El estado del conocimiento científico, y de la técnica en la materia, así lo permiten. Y en ambos hombros esta tesis doctoral se ha subido para exponer su propia definición de nZEB o, más bien de MEB, utilizando la terminología más amplia ya definida en este trabajo.

Los criterios específicos que a nuestro juicio debe cumplir un edificio para ser considerado MEB son los que se exponen a continuación:

1. La demanda de energía de calefacción y refrigeración del edificio debe ser menor de 10 kWh/m^2 al año.
2. La demanda de energía primaria total del edificio debe ser menor de 80 kWh/m^2 al año.
3. El nivel de calidad del aire interior en el interior del edificio debe mantener la concentración de CO_2 por debajo de las 1.000 ppm.
4. El porcentaje anual de horas de sobre enfriamiento y sobre calentamiento en el aire interior del edificio, expresado en términos de temperatura equivalente, debe ser menor del 10%.
5. El nivel de estanqueidad de la envolvente térmica del edificio en la prueba del BDT debe ser menor de 0,6 h^{-1}.
6. El estudio termográfico de la envolvente térmica completa del edificio debe confirmar que no existen puentes térmicos significativos.
7. El análisis de los datos de consumo, humedad y temperatura, y calidad del aire en fase operativa, aportados por la instrumentación instalada en el edificio, debe validar anualmente los puntos 1, 2 y 3.
8. La instalación de energía renovable instalada en el edificio deberá estar integrada arquitectónicamente y generar más de 80 kWh/m^2 al año.
9. La ocupación media diaria del edificio deberá ser mayor de 10^{-2} personas/m^2.
10. El edificio debe ser operado y mantenido por personal competente en MEB.

Mientras, a la espera de saber exactamente a qué referirnos cuando hablemos de nZEB en España, conceptos más ambiciosos como los de ZEB y +ZEB se encuentran muy lejos de ser recogidos en la normativa estatal de obligado

cumplimiento. El estado de la ciencia y de la tecnología en la actualidad nos permiten promover edificios que consumen muy poca energía (nZEB), pero también edificios de consumo real de energía cero (ZEB) y edificios que producen más energía de la que consumen (+ZEB). En este trabajo nos referiremos a ellos de manera genérica como edificios de consumo mínimo de energía (MEB), categoría que englobará a los nZEB, a los ZEB y a los +ZEB cuando no sea imprescindible distinguir entre ellos.

La normativa europea relativa a eficiencia energética se está revisando en la actualidad. Está previsto que para 2030 se adopten medidas complementarias, medidas que podrían apuntar al objetivo de ZEB, o yendo más allá, al +ZEB.

La integración arquitectónica de las energías renovables y los sistemas inteligentes de toma de decisiones constituyen el horizonte hacia donde enfocar las nuevas estrategias de máxima eficiencia energética en los edificios [93-97]. Cualquier avance significativo que persiga progresar del nZEB al +ZEB pasa por la incorporación de las energías renovables al edificio. Conseguirlo no es sólo una cuestión técnica -hoy por hoy no por ensayada menos necesitada de optimización- sino también estética, para lo que resultará imprescindible la correcta integración arquitectónica de la solución propuesta.

Otra vía paralela para avanzar hacia el +ZEB es la de trabajar estrechamente de la mano de la ingeniería para implementar soluciones inteligentes: algoritmos de aprendizaje automático, algoritmos de optimización y herramientas de asistencia a la toma de decisiones.

Finalmente, si nos centramos el resolver el problema de los edificios existentes, la Directiva 2012/27/UE establece un marco común de medidas para asegurar la consecución del objetivo principal de un 20% de ahorro energético en la UE para 2020, y expone en su punto 17:

> *El ritmo de renovación de edificios tiene que aumentar ya que el parque inmobiliario existente constituye el sector con mayor potencial de ahorro de energía. Además, los edificios son cruciales para alcanzar el objetivo de la Unión de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 80% y un 95% para 2050 respecto a 1990 (...)*

Más adelante, en su Art. 4 (Renovación de edificios):

> *Los Estados miembros establecerán una estrategia a largo plazo para movilizar inversiones en la renovación del parque nacional de edificios residenciales y comerciales, tanto público como privado (...). A más tardar el 30 de abril de 2014, se publicará una primera versión de la estrategia, que se actualizará cada tres años y será remitida a la Comisión en el marco de los Planes nacionales de acción para la eficiencia energética.*

2.5 CONCLUSIONES

En este segundo capítulo de esta tesis doctoral, hemos introducido un concepto, que creemos propio, y que pretende aglutinar la nomenclatura aceptada internacionalmente en la medida de la eficiencia energética en la edificación. Léase en orden de menor a mayor exigencia: nZEB, ZEB y +ZEB. Dicho concepto es el de edificio de energía mínima (MEB).

Dicha definición pretende focalizar el objetivo a cumplir por el diseñador, constructor y mantenedor del edificio, en el hecho de que éste esté siempre consumiendo el mínimo de energía posible. A partir de ahí, cumplido este criterio de optimización, el edificio puede ser pequeño demandante de energía (nZEB), no demandante de energía (ZEB) o, incluso, productor neto de energía (+ZEB). Esto es muy importante porque de poco vale disponer, por

ejemplo, de 1.000 m² de cubierta para generar cientos de kW de energía eléctrica fotovoltaica, si el edificio no está previamente optimizado. Así, según nuestro criterio, este edificio podría ser generador neto de energía, pero nunca +ZEB en el sentido de MEB definido en este trabajo de investigación, ya que previamente no se ha ocupado de reducir al máximo su demanda energética.

En este capítulo hemos analizado en profundidad el concepto de nZEB, que si bien todavía está pendiente de concretar en algunos países de la UE como el nuestro, si que está incorporado con insistencia en la normativa europea a nivel de directiva. No obstante, la normativa estatal española de obligado cumplimiento en la fecha de realización del presente trabajo de investigación, se limita a perseguir un objetivo de edificio más eficiente que el anterior al CTE, pero mucho menos ambicioso que el nZEB al que nos emplaza la UE.

Estudiando el marco normativo actual, hemos demostrado que existe un mandato claro y persistente de la UE, en relación a la obligatoriedad de que a partir de 2020 todos los edificios que se empiecen a construir en Europa sean nZEB (2018 para edificios públicos). Aunque el de nZEB se trata de un concepto todavía indefinido en nuestro país, la UE en su informe COM(2013) 483 [89] nos emplaza a concretarlo lo antes posible.

Para encontrar referencias válidas en relación al concepto nZEB debemos recurrir a los sistemas de certificación voluntarios. Estos sistemas de certificación sí que proponen requisitos concretos para alcanzar el nivel nZEB. *Passivhaus*, por ejemplo, propone los valores máximos de 15 kWh/m²a para demanda de calefacción y refrigeración y los 120 kWh/m²a para demanda de energía primaria.

En este segundo capítulo no sólo nos hemos centrado el concepto de nZEB sino que exploramos sus posibilidades de mejora, los denominados ZEB y +ZEB. Se trata de edificios que no consumen energía porque integran sistemas de generación renovables hasta el punto de que son capaces de producir más energía de la que necesitan para operar. Se trata de dos conceptos actualmente fuera de las normativas de obligado cumplimiento, si bien algunos sistemas de certificación voluntaria sí que empiezan a incorporarlos.

En este segundo capítulo hemos propuesto la agrupación de estos tres tipos de edificios (nZEB, ZEB y +ZEB), caracterizados por un nivel máximo de eficiencia en el uso de la energía, en un único concepto de MEB, o edificio de mínima energía. Se trata de un concepto genérico que nos permite referirnos a edificios especialmente eficientes en el uso que hacen de la energía, sin establecer matices ni diferenciaciones entre ellos.

Si queremos ir todavía más allá en la persecución del objetivo de la máxima eficiencia en edificios (ZEB y +ZEB), es necesario recurrir a la integración de las energías renovables en la edificación. De nuevo tenemos que acudir a las últimas versiones de algunos sistemas de certificación voluntarios para encontrar alguna referencia a energías renovables en la edificación. *Passivhaus*, en sus nuevos niveles de certificación aún no disponibles en todos los países, propone los valores mínimos de 60 y 120 kWh/m²a de generación renovable para la *passivhaus plus* y la *passivhaus premium*, respectivamente.

Ninguna estrategia concreta se nos propone, ni en la normativa ni en los sistemas de certificación voluntarios, para alcanzar este nuevo y ambicioso objetivo de +ZEB. Un objetivo que mira más allá de 2020, y que persigue en último término convertir a los edificios en fuente de energía primaria, deslocalizada y no contaminante. Esta estrategia, en cualquier caso, debería integrar la fase inicial de negociación con el cliente y la fase final de operación del MEB, además de las habituales fases de proyecto y ejecución de obra, estas últimas sí presentes en la totalidad de sistemas de certificación voluntaria estudiados.

Igualmente, la validación del MEB debería basarse en la instrumentación y el análisis de los datos obtenidos en la fase de operación del edificio, y no únicamente en estimaciones realizadas con programas de simulación energética.

Este segundo capítulo de la tesis doctoral incluye un conjunto de diez criterios específicos que constituyen una propuesta de definición de MEB en España. Se trata de diez aspectos concretos y verificables, que ponen de relevancia los aspectos claves que, a juicio de esta investigación, deben ser tenidos en cuenta por el promotor, el constructor, el proyectista y el operador de MEB.

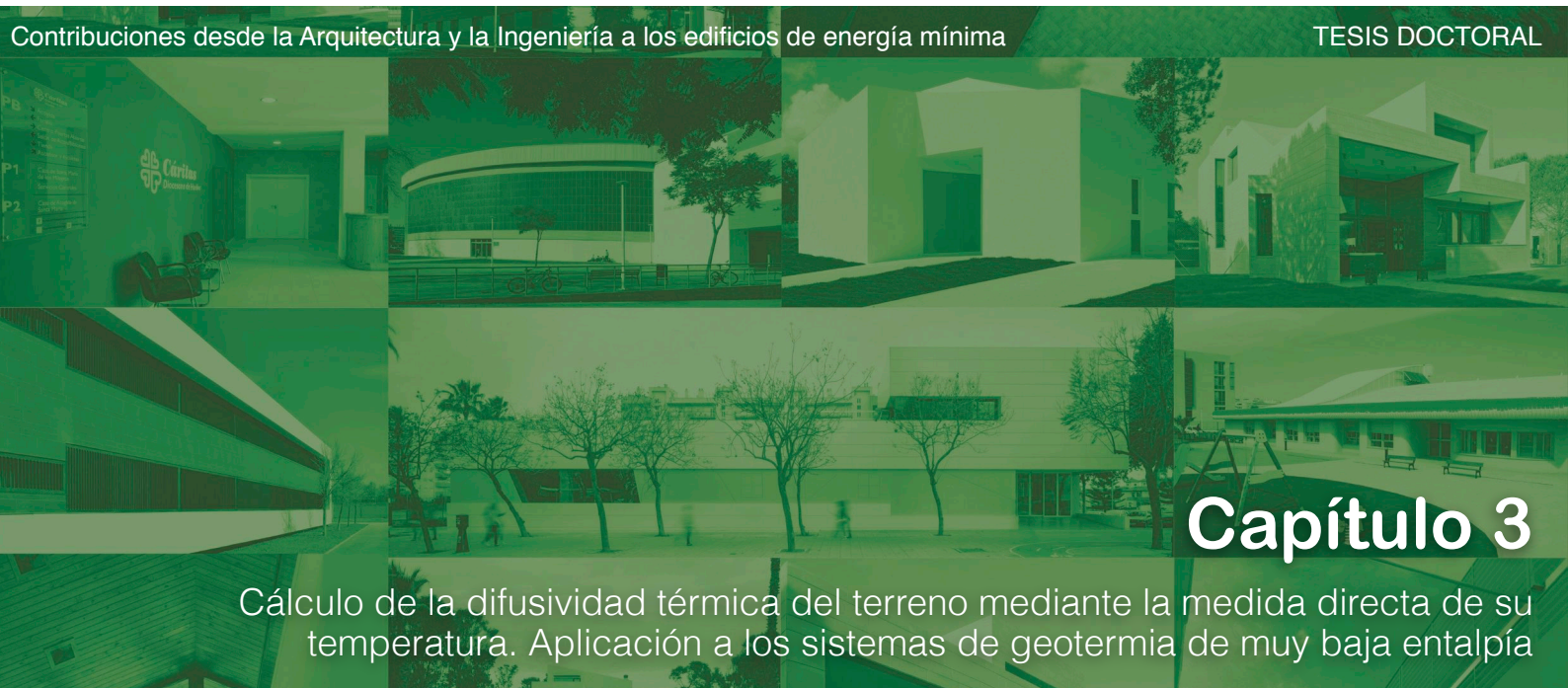
Por otras parte, no parece realista aspirar a la reducción significativa del consumo de energía en el sector de la edificación (20% para 2020 según UE) sin actuar sobre el parque ya edificado, únicamente regulando las nuevas construcciones. La rehabilitación energética de edificios existentes debe ser, por tanto, un objetivo preferente en el conjunto de estrategias encaminadas a la mejora de la eficiencia energética en la edificación.

Finalmente concluir que, del estudio comparado realizado de los principales sistemas de certificación voluntaria, resulta que la totalidad de ellos han sido concebidos desde la perspectiva del clima frío. Esto supone un sesgo importante cuando de lo que se trata es de analizar el comportamiento de edificios en clima cálido, donde el problema no es conservar el calor interior del edificio sino evitar que éste penetre al interior a través de la envolvente térmica.

Es por esto que en el siguiente capítulo de esta tesis realizamos una aportación original para la reducción del consumo de energía del MEB en clima subtropical, asociada a la mejora de la calidad del aire interior. Se trata de un nuevo método para la optimización del diseño de tubos de aire enterrados, dispositivos geotérmicos VLEGE de muy baja entalpía, utilizados para la ventilación de edificios en condiciones de clima cálido.

A modo de aportación concreta para adaptar el MEB a las condiciones de clima subtropical, en el capítulo siguiente de esta tesis doctoral planteamos una solución de ventilación del edificio aprovechando al máximo las posibilidades que ofrece la geotermia de muy baja entalpía, optimizando mediante instrumentación de bajo coste parámetros fundamentales para el diseño de estos dispositivos.

Contribuciones desde la Arquitectura y la Ingeniería a los edificios de energía mínima TESIS DOCTORAL



Capítulo 3

Cálculo de la difusividad térmica del terreno mediante la medida directa de su temperatura. Aplicación a los sistemas de geotermia de muy baja entalpía

3. CÁLCULO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA DEL TERRENO MEDIANTE LA MEDIDA DIRECTA DE SU TEMPERATURA. APLICACIÓN A LOS SISTEMAS DE GEOTERMIA DE MUY BAJA ENTALPÍA

Este tercer capítulo desarrolla una metodología y un sistema de instrumentación para la medición indirecta de la difusividad térmica de un terreno a una profundidad determinada, desde la medición de su temperatura a esa profundidad. La metodología y el sistema desarrollado han sido probados y utilizados en el diseño de una instalación VLEGE para una vivienda unifamiliar aislada con sótano en las afueras de Huelva (una ciudad en el suroeste de España). Se trata de una aportación de interés específico en el proyecto de MEB de nueva construcción en clima subtropical.

En este tercer capítulo analizamos la eficiencia de un sistema VLEGE, consistente en un tubo enterrado por el que circula aire para la ventilación de los espacios interiores del edificio, previo intercambio de calor con el terreno. Se trata de una aportación fundamental, por cuanto viene a suponer una alternativa más eficiente para el clima subtropical a las ya conocidas soluciones de ventilación tipo VMRC de alta eficiencia, de valor comprobado en clima frío, pero cuya eficiencia disminuye drásticamente en clima subtropical.

En este capítulo se presenta una metodología y un sistema de instrumentación para la medida indirecta de la difusividad térmica de un terreno a una profundidad determinada, a partir de la medición de su temperatura a esa misma profundidad. Su desarrollo se ha llevado a cabo considerando su aplicación al diseño y dimensionado de un VLEGE, pero puede tener otras muchas aplicaciones en el campo de la construcción, la agricultura o la biología.

La metodología es sencilla y económica porque se aprovecha de los sondeos geotécnicos que, en aplicación de la normativa estructural de obligado cumplimiento en España [98], es necesario realizar, con carácter previo a la construcción de un edificio, para determinar los parámetros mecánico resistentes del terreno sobre el que se va a cimentar. De modo que el sistema está pensado para que, a la vez que se retira la cabeza de rotación del sondeo geotécnico, se introduce el dispositivo de captación de temperatura del terreno que constituye la base de la instrumentación necesaria para realizar las mediciones.

La metodología y el sistema desarrollado han sido testados y aplicados al diseño de un sistema VLEGE para una vivienda unifamiliar aislada en las afueras de Huelva, una ciudad en el suroeste de España. Los resultados experimentales obtenidos validan la metodología propuesta.

Este tercer capítulo de la tesis doctoral se estructura de la siguiente forma. En la sección 2 se explica el fundamento teórico que desarrolla la metodología para calcular la difusividad térmica del suelo a una profundidad determinada, a partir del conocimiento de la temperatura del suelo a esa misma profundidad. En la sección 3 se explica el sistema de instrumentación *hardware/software* desarrollado para medir la temperatura del suelo a una profundidad determinada, con precisión y a bajo costo. La sección 4 se dedica a la experimentación en un escenario real y a la exposición de los resultados obtenidos. Estos resultados demuestran la utilidad de la solución propuesta. Por último, la Sección 5 proporciona las conclusiones sobre el trabajo realizado y sus resultados.

Tratándose de una tesis doctoral con mención internacional, el desarrollo del capítulo que se expone a continuación, se realiza íntegramente en inglés.

3.1 INTRODUCTION

Geothermal exchange technology takes advantage of the thermal energy stored in the surface area of the Earth (first 100 m). Up to 10-15 m deep approximately, ground heat is supplied by the sun and rain. From there the underground temperature increases about 3 °C per 100 m depth, due to the internal thermal energy of the Earth. On average, the underground temperature at 10 m depth remains constant throughout the year and substantially equal to the average temperature of the place [99-102].

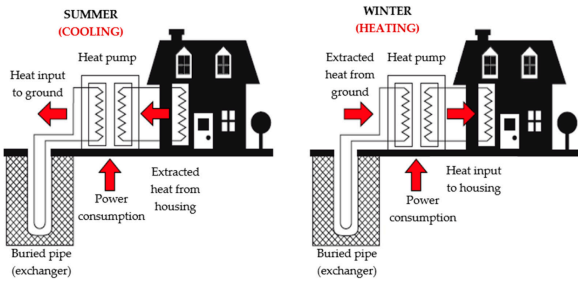


Figure 3.1. Typical operation of a geothermal exchange system with heat pump

Initially geothermal exchange systems were developed for heating in cold climates, hence its development in northern European countries, USA and Canada, but they are also suitable for cooling, increasing their profitability and interest in countries of southern latitudes. In cooling mode, heat is extracted from the building and this is transferred to the ground. In heating mode, heat is extracted from the Earth and it is transferred to the building (figure 3.1). Of course the underground temperature remains unchanged (or it does so very slightly depending on depth), but the room temperature is what changes.

Geothermal energy is called very low enthalpy (very low enthalpy geothermal energy, VLEGE) when the heat transfer from the ground occurs at low depth and low temperature (usually less than 40 °C) [100]. To exploit effectively the heat capacity of the ground, a heat-exchanger system has to be constructed [103]. In practice, heat exchange is performed by internal fluid flowing through a collector (buried pipe), which is usually water, glycol water or even air. The geothermal exchange can be performed through a heat pump [104], whereupon the internal and external circuits of the building become independent (see figure 3.1), or directly by circulating the geothermal fluid through the network building's HVAC (heating, ventilating, and air conditioning) by floor heating, radiators or air outlets for example.

As it is well known the coefficient of performance (COP) of a heat pump is inversely proportional to the temperature difference of the heat sources [101, 102, 105]; in the case of the VLEGE it is not big and substantially independent of seasonal variations. Even so the COP of the heat pump of a VLEGE system is

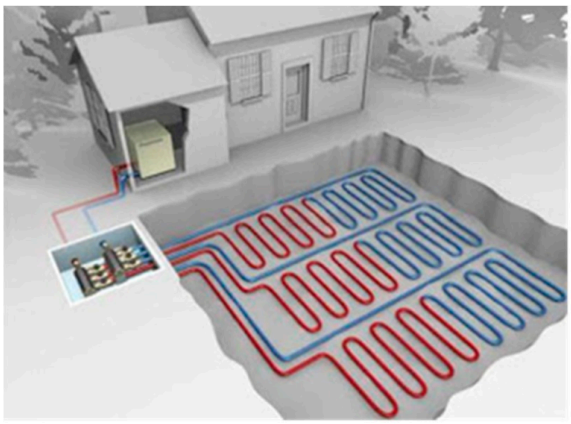




Figure 3.2. Collectors typical arrangement in a VLEGE facility

around 4, which means that the system captures an average of 3 kWh of thermal energy from the ground per kWh consumed from the mains supply to power the heat pump. For this reason VLEGE is a very competitive alternative compared with conventional alternatives for heating and cooling. Furthermore from the environmental point of view the impact of a VLEGE system is much lower than a conventional air conditioning system.

Since VLEGE uses the heat accumulated in the more superficial layers of the Earth, collectors are usually placed horizontally adopting different shapes (figure 3.2) and trying always to have the largest surface area in contact with the ground [106]. The sizing of these collectors is carried out according to the thermal performance of the soil, which depends on its composition, density, water content and of course on the depth. The two key soil parameters for designing a VLEGE system are the soil temperature at the collectors depth T(z) and the ground thermal diffusivity at that depth (α_z). By definition thermal diffusivity, α (m2/s), is the thermal conductivity divided by density and specific heat capacity at constant pressure, and it represents the ability of a material to conduct thermal energy relative to its ability to store thermal energy. Since ground thermal diffusivity depends on soil type, density and water content, the range of values that can take is very broad. For instance in [107] ground thermal diffusivity values ranging from: $1.72 \times 10^{-6}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$ to $3 \times 10^{-6}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$, depending on the soil characteristics. Another example: for a sandy soil with a density of $1.46 \times 10^{3}\mathrm{Kg}/\mathrm{m}^3$, [108] provides values ranging between $0.3 \times 10^{-6}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$ to $1.1 \times 10^{-6}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$, depending on its water content. If we continue researching on the specialized literature, we can find very different value ranges. This is because even in the same soils (same composition), if their density and / or moisture degrees are different their α values as well. This means that for a given soil and depth, α can varies throughout the year, depending on rainfall. Therefore it makes sense to work with average values.

Assuming that the soil behavior is uniform (for stricter mathematical study beyond the scope of this chapter can be found [109] among other references), which as we know is not true in practice, ground thermal diffusivity values are tabulated according to the soil composition, so ground thermal diffusivity can be estimated by tables. In a more realistic way, ground thermal diffusivity can be measured in the laboratory from a test tube of the ground or performing a thermal response test (TRT) [110-112].

A TRT is an *in-situ* measurement method which is currently the most exact way to determine the ground effective thermal properties; it is the most reliable and the only recommended for large or medium VLEGE facilities, however it is a complex and expensive method. Therefore, the TRT is impractical to carry out in most VLEGE facilities (which are small and domestic) so that designers resort to using tables. This implies an approach to the composition, water content and compaction of the ground at the depth where the collectors are buried; consequently the probability of making mistakes can be high. Incorrect design of the VLEGE facility (diameter and collector length, type of material, type of fluid and heat exchanger) cause malfunction and poor performance of the heat pump. This is a serious problem: dig up collectors and change them is expensive and sometimes, depending on the characteristics of the facility, impossible. Consequently, this may result in the need to use external heating / cooling, which call into serious question the energy efficiency of the facility.

3.2 THEORETICAL FOUNDATION

The energy from solar radiation and other atmospheric agents is continuously transferred to the surface of the Earth, which causes effects on its temperature in depths close to the surface. The observed soil temperature at various depths has been studied decades ago [113-116]. Since then, no new theoretical approaches in this field are found in literature, but obviously what has evolved with

technological advancement are measuring systems and data processing.

It is well known that the typical annual cycles of monthly average soil temperatures at the surface and at depths close to the surface, follow a pattern of easy fit to a simple harmonic function. Then, the temperature in the soil surface can be represented by the following function:

$$T_{soil\ surface}(t) = T_m - T_p \cos\left(\omega t - \varphi\right) \quad (1)$$

where:

$T_m =$ Annual average temperature of soil in the stable layer; it is commonly set to the average temperature of air, practically the average temperature in the place (ºC).

$T_p =$ Amplitude (°C); the peak deviation of the function from zero. In this case the annual amplitude of the monthly average temperature cycle in the place.

$t =$ Time coordinate (s). To set a starting time (t = 0), it begins to run from 1 January at 0 s. This way of measuring the time obviously result in a phase shift since the beginning of the sinusoid in general will not coincide with t = 0.

$\omega =$ Angular frequency (rad/s). The rate of change of the function argument in units of radians per second; $\omega = 2\pi/T$, where T is the period of the sinusoid; in this case the annual temperature cycle, *i.e.*,
$T = 365.242189 \times 24 \times 3600 = 3.1557 \times 10^7$ s.

$\varphi =$ Phase (rad). When φ is non-zero, the entire waveform appears to be shifted in time by the amount φ/ω seconds. A negative value represents a delay, and a positive value represents an advance.

The soil temperature oscillation near the surface for the stand point of heat conduction theory has been discussed since decades in various texts of heat transfer [117-119]. The subsurface is treated as a semi-infinite domain.

$$\Omega = \left\{ \mathbf{x} = (x, y, z)^T : -\infty < x, y < \infty, 0 \le z < \infty \right\}$$

The subsurface temperature, $T(\mathbf{x}, t)$, at any point $\mathbf{x}$ and time t is provided by the heat conduction equation:

$$\rho C \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \nabla \bullet \left[\mathbf{k} \nabla T(\mathbf{x}, t) \right] \quad (2)$$

where ρ is the average soil density (Kg/m³), C the soil specific heat capacity (J/Kg · K) and $\mathbf{k}$ the soil thermal conductivity (W/m · K). The three soil parameters ρ, C and $\mathbf{k}$, vary, to different degrees, in space and time due to soil heterogeneity and changing water content. Soil anisotropy gives rise to the thermal conductivity tensor $\mathbf{k}$, whose principle components are aligned with the coordinate system, such that the off-diagonal components of this tensor are K_{ij} = 0 for $i \neq j$. Equation (2) is subject to an initial condition:

$$T(\mathbf{x}, 0) = T_m \quad (3)$$

This temperature varies in response to atmospheric fluctuations at the ground surface $(z = 0)$, which manifest themselves through the boundary condition (1): $T(x, y, 0, t)$. By solving the heat equation in the transient state for a semi-infinite medium whose surface temperature is imposed by Equation (1), the soil temperature *versus* depth only can be obtained:

$$T_{soil}(z, t) = T_m - T_p e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \cos\left(\omega t - \varphi - z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} \right) \quad (4)$$

where z is the depth (m) and α is the ground thermal diffusivity (m²/s) given by:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C} \quad (5)$$

Equation (4) allows us to show some important features of the evolution of soil temperature with depth:

- As the depth increases the second term of Equation (4) tends to zero, which means that the soil temperature tends to the annual average in the place (T_m).
- The amplitude of the temperature variation decreases exponentially with depth.
- The phase shift increases with depth.

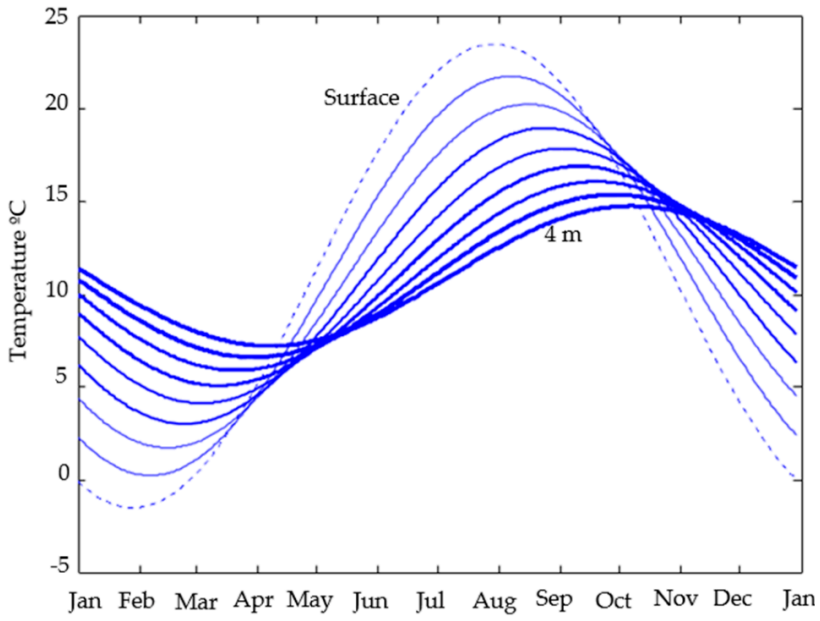


Figure 3.3. Typical temperature behavior of the soil close to the surface at different depths. The curves show the evolution of the temperature from the surface (0 m) to 4 m depth in steps of 0.5 m

As an illustrative example, let's consider a place where the annual average temperature is 11 °C (T_m in equation (4)), the annual peak to peak amplitude of the monthly average temperature cycle $\left(T_{pp}\right)$ is 25 °C $\left(\text{then } T_p \text{ in Equation (4) is } 25/2 \ = \ 12.5\ ^{\circ}\text{C}\right)$ and whose physical soil characteristics, constant regardless of the depth, are:

ρ = 2,000 Kg/m^3
k = 2 W/(m · K)
C = 99 J/(Kg · K).

The application of Equation (4) to this place allows obtaining the temperature behavior of the soil at different depths. This is shown in figure 3.3, where the behavior of the soil temperature is drawn from the surface to a depth of 4 m in steps of 0.5 m.

Note in figure 3.3 that, as the depth increases, the amplitude of thermal fluctuations decreases, and their maximum and minimum are going phased out (due to the thermal inertia of the soil itself). At 4 m deep, the phase shift reached two months. As the depth increases annual fluctuations in soil temperature are diminishing and it is getting closer to the annual average of the place. In the real world, and for a practical case, in depths between the surface and about 10 m, the temperature of the soil varies depending on the depth and anything that disturbs the type, compactness and uniformity of the ground and of course moisture or groundwater (anything that changes the ground thermal diffusivity). This means that in general the ground thermal diffusivity will not be constant, whereby the distribution of the actual curves may not be as uniform as in figure 3.3. This actual behavior goes unnoticed when considering the ground thermal diffusivity of a soil at a given depth from tables, since it is considered uniform.

From equation (4) and considering a ground thermal diffusivity obtained by tables for example, we can calculate the evolution of the soil temperature at any depth between the surface and the deep where the soil temperature tends to the annual average in the place $\left(T_m\right)$, *i.e.*, around 10 m. Nevertheless we know that ground thermal diffusivity is not constant, which prevents knowing the degree of accuracy in the

calculation of the temperature at the considered depth. But what can we do if we have precise ground temperature measurements at that depth?

From equation (4), the minimum (T_L) and maximum (T_H) temperatures of the soil that take place during the annual cycle for any depth (z) can be calculated. This is:

$$T_L = T_m - T_p \mathrm{e}^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \qquad (6)$$

$$T_H = T_m + T_p \mathrm{e}^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}} \qquad (7)$$

From any of the above two equations the ground thermal diffusivity at any depth z can be calculated. For example from equation (7):

$$\alpha_z = \frac{\omega}{2}\left(\frac{z}{\ln\frac{T_p}{T_H - T_m}}\right)^2 \qquad (8)$$

T_m and T_p values are easy to know from meteorological stations or by measuring at place, so if you can measure accurately T_H over annual cycle for a z depth, equation (8) allows obtaining the ground thermal diffusivity without need to make estimates by tables or calculating it by the costly and complex TRT. Similar reasoning could be made with respect to T_L. Certainly α_z can vary along a seasonal cycle (to find instantaneous values you can use equation (4)), but in the absence of extreme situations such as flooding for example, at depths far of the surface (the interest for VLEGE) there is less influence of surface weather, therefore under normal conditions the ground thermal diffusivity will have an average value close to that obtained by equation (8).

3.3. DEVELOPED INSTRUMENTATION SYSTEM FOR MEASURING GROUND TEMPERATURE

Figure 3.4 shows the block diagram of the developed instrumentation system for measuring ground temperature. The system is monitored and controlled remotely by two microcontroller cards via a virtual instrument (VI) from anywhere with an Internet connection. Now we will be explaining each of the blocks.

3.3.1 Ground Temperature Probe

For continuous measurement of the temperature of the ground at different depths, a ground temperature probe (GTP) was designed and built using a PVC pipe of 5 m length and 100 mm diameter. In it, 24 temperature sensors (TS) with digital output and a 1-wire bus connection (patented by the authors, [120]) are placed. Each TS can be connected/disconnected to the 1-wire bus by an addressable electronic switch (Sw[1]) which function will be explain later in this section. TS are spaced 20 cm each, and they are glued to a metal ring to favor the thermal transmittance between ground and sensor (see figure 3.5a). Metal rings are glued to the pipe and securely fastened by a polyethylene clamp (see Figure 3.5b). All wiring flows inside the pipe and it is filled with polyurethane foam to TS protect. 24 TS are located from level 0.2 m to 4.80 m deep. The first 20 cm of GTP must be above the surface to facilitate connections and recovery, and at the tip of the GTP it is not advisable to place TS as it is the part that suffers most in the introduction to the field. The GTP can be disassembled into two sections of 2.5 m for easy transport (see figure 3.5b). Of course we could have another GTP length; however it has done so for constructive interest of the house where the experiment was conducted. That is, when a chalet or house with basement is built, an excavation of approximately 3 m around the perimeter of the house is required. From this depth it is easier and cheaper to dig about 2 m further by a backhoe loader. Therefore the maximum depth to build at low

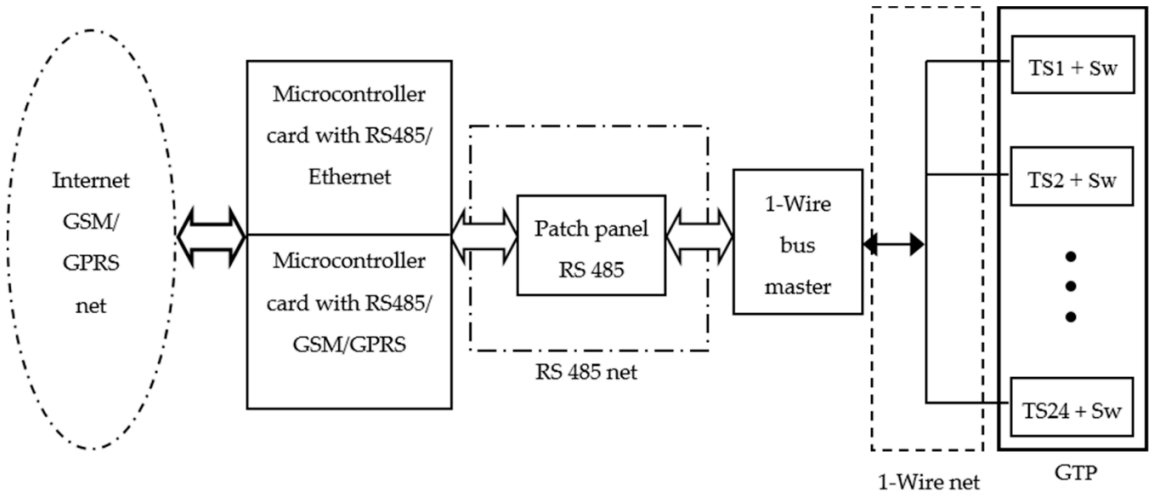


Figure 3.4. Block diagram of the developed instrumentation system for measuring ground temperature

cost a VLEGE facility in a chalet or house with basement is around 5 m. Of course you can build the VLEGE facility deeper; however this requires a work infrastructure which makes much more expensive the construction. In any case, obviating the construction work details that are not the subject of this chapter, developed system experimentation (see Section 4) was carried out with ground temperature measurements between 0 and 4.80 m depth.
The 24 TS are connected via 1-wire bus (see figures 3.4 and 3.5a). This is a low-cost bus for digital communication over twisted-pair cable with 1-wire components. As each TS has a unique 64-bit serial code, it is possible to connect multiple TS to the same 1-wire bus quickly, simply and very cheaply. Using the code from each TS, its temperature measurement can be addressed from a PC or microcontroller board. The 1-wire bus is not a bus designed to operate in industrial environments (where noise can be an important factor to consider) because it is not differential. In [121] it is shown as providing robustness to the 1-wire bus and how to connect the TS to the bus.

Regarding the connection of sensors in the GTP and its electronic control, a robust solution it was implemented as required for our system. With respect to TS communications via the 1-wire bus, if one of the connected TS fails, the rest of the bus can become unusable. When this occurs in a facility of easy access, the damaged TS is changed and the problem is solved.

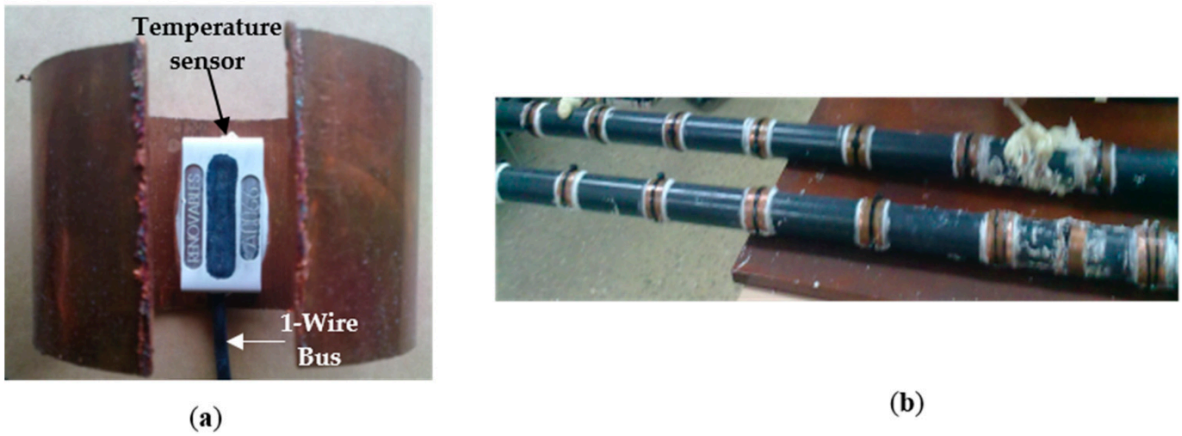


Figure 3.5. (a) Temperature sensor attached to the metal ring; (b) GTP disassembled into two sections and arrangement of the sensors on the probe

However, for our application is a major problem because to solve it would have to dig up the GTP. In order to prevent and resolve this potential problem, each TS can be connected/ disconnected to the 1-wire bus by an addressable electronic switch (Sw). In figure 3.6 detail of TS + Sw connection of figure 3.4 is shown. The switch has been implemented by the DS2413 integrated circuit and allows physically disconnecting the TS of the 1-wire bus by the GND line.

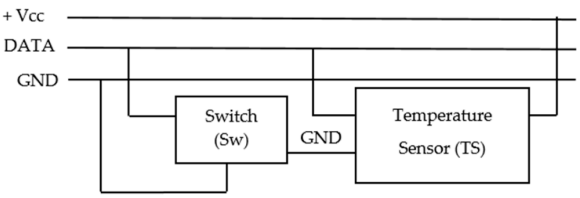


Figure 3.6. 1-Wire bus connection of the temperature sensor + switch set

The scheme of figure 3.6, also serves another important function: when a TS branch is connected to a 1-wire bus there is a mismatch impedance at the branch point which can cause reflections to the bus. To avoid it, a 100 Ω series resistor between DATA and GND lines on each TS should be placed. The internal resistance of the switch fulfills this task, avoiding the need to place an additional external resistance [122].

3.3.2 The 1-Wire Bus Master

A detailed explanation of the 1-wire bus master (see figure 3.4) can be found in [121]; it is designed around PIC 18F252 and is able to addressing simultaneously two 1-wire networks of 50 TS each. For this application we are only using 24 sensors, so that the same 1-wire bus master also applies for deeper studies where more sensors would be required.

3.3.3 The RS 485 Patch Panel

The RS 485 patch panel (see figure 3.4) has the function to allow connection to multiple sensors (room temperature, irradiance, speed and direction wind, humidity, etc.) or other devices to the system. In this way a single communications channel as that of figure 3.4 can monitor multiple variables, although the measurement points are spaced hundreds of meters.

Choosing the RS 485 bus is based on its robust features in terms of noise performance (it is a differential bus) and its ability to carry data over long distances.

3.3.4 Microcontroller Cards

The two microcontroller cards (see figure 3.4) are based on Arduino, an open-source prototyping platform based on easy-to-use hardware and software. These cards control communications with devices connected to patch-panel and store measured data in a SD memory. In addition they manage online external communications either via Ethernet or GSM/GPRS. Although data are sent in real time, they are also stored in one of the microcontroller cards for safety, so if for any reason communications fail, always be possible recover the data. The system is designed so that in those locations that do not have Internet connection, you can use the mobile communications GSM / GPRS. In the worst case, if not even there is mobile phone coverage we can always use a radio modem link. This last case is not included in figure 3.4.

3.3.5 Monitoring and Control Software

For full monitoring and control of the developed instrumentation system, we have developed a VI in LabVIEW™, which is located on a computer at the headquarters of the research group to which the authors belong, at the Higher Technical School of Engineering of the University of Huelva. In this way the whole facility operates as a remote lab [123].

The VI consists of different sub VI with screens that display real time information. It also enables data processing for several kinds of operations and also provides multiple graphs types. The data can be processed by the VI itself or exported in various formats like spreadsheet for example. This will be discussed in more detail in Section 4 of this manuscript.

Figure 3.7 shows the VI screen with real-time measurement of the 24 TS of the GTP. Figure 3.8 shows the VI screen to detect the failure of a

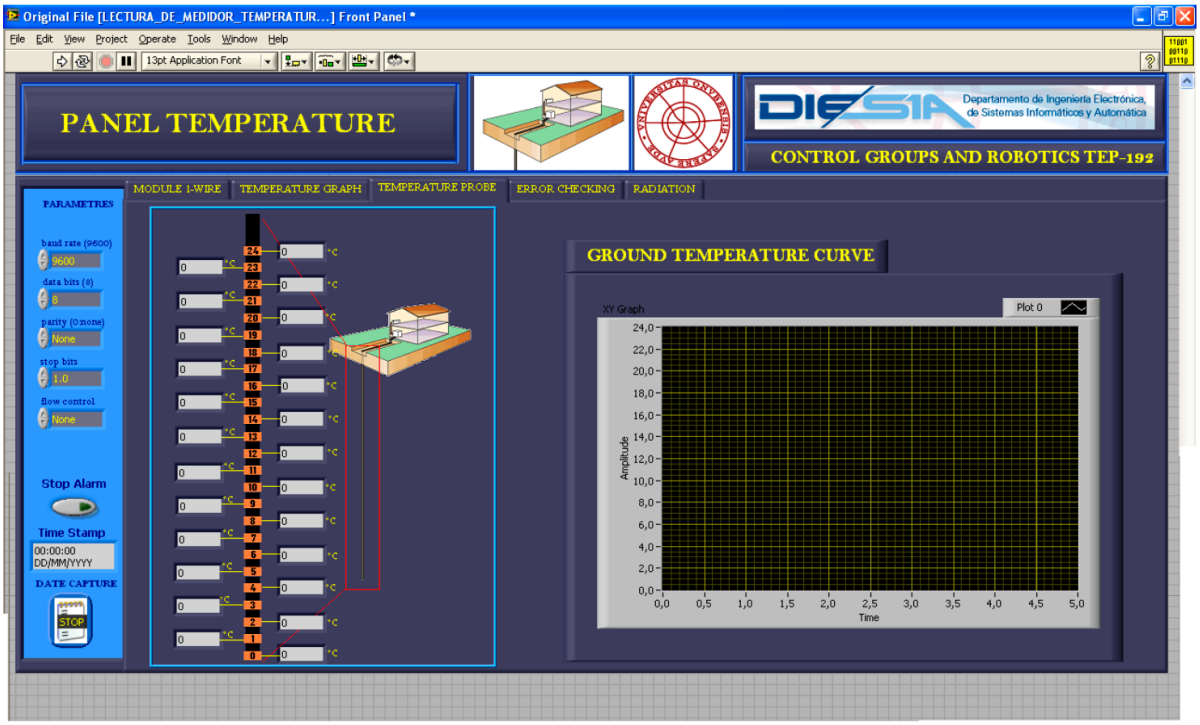


Figure 3.7. Real time temperature measurement of the 24 TS of the GTP

sensor. Failure detection is performed by comparison between adjacent sensors. The temperature gap is adjustable for each application and when it is exceeded an alarm is triggered. When a sensor malfunction it can be disconnected remotely from the VI thanks to developed electronics (see figure 3.6).



Figure 3.8. Screen that shows faults in any TS of the GTP and allows adjustment of all parameters

3.4 EXPERIMENTATION AND RESULTS

In order to put into practice and test the developed method and instrumentation system, we have had the opportunity to participate in the construction of a chalet with basement located at the southwest of Spain. Here we have taken soil temperature measurements with the developed GTP for about a year. At the building site local climate is warm tempered by the influence of the Atlantic Ocean with an annual average temperature around 19 °C. The coldest month is usually January (some years December or February), with an average temperature around 12 °C, and the warmest July (some years August), with an average temperature around 30 °C. The annual rainfall is around 500 mm and it has over 3000 h of sunshine and only about 60 cloudy days per year.



Figure 3.9. (a) Drilling machine; (b) Steel pipe for introducing the probe

The chalet construction work has served as a real laboratory for about a year. In figure 3.9a geotechnical drilling machine that was also exploited to make the drill through which the probe was introduced into a steel pipe (figure 3.9b) is shown. Then, once the probe was placed in its final position, the steel pipe was

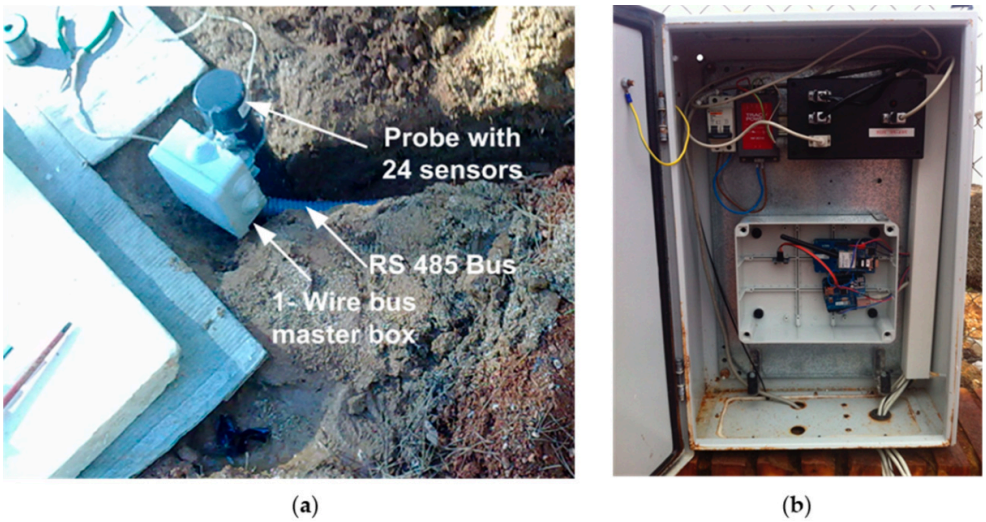


Figure 3.10. (a) Details of the buried GTP tip, box which houses the 1-wire bus master and RS 485 bus. (b) Waterproof box housing remainder elements of the measurement system

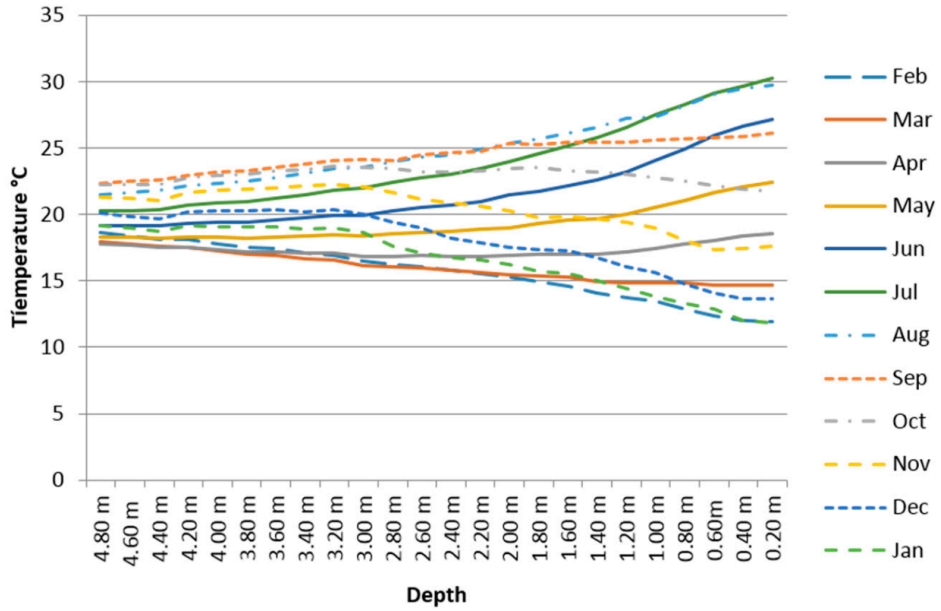


Figure 3.11. Behavior of the average monthly temperature regarding soil depth

removed. Later the holes between the probe and the ground were filled and compacted carefully. Finally the perimeter was watered abundantly, in order to favor the GTP contact with the ground along its whole length. The measurement campaign began when this artificial humidity was dissipated, several days later.

The initial end of the probe, once buried, remains outside (see figure 3.10a). The 1-wire bus that picks up signals from the 24 TS (see figures 3.4 and 3.5) goes from the GTP to a waterproof box (protection category IP 65) which houses the 1-wire bus master. From here the RS 485 bus goes to another larger size waterproof box which houses the remaining elements of figure 3.4 (see figure 3.10b).

The buried GTP has been acquiring data for about a year, continuously (six measurements per minute) from 12 months (February 2013 to

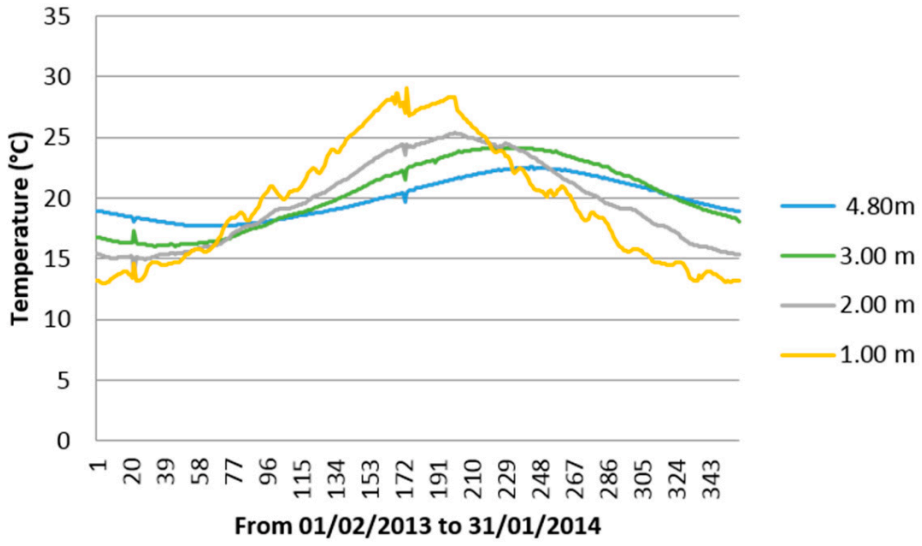


Figure 3.12. Average daily temperatures at different depths from 1 m to 4.8 m

January 2014). Figure 3.11 shows the average monthly temperatures regarding depth measured by the GTP. Note clearly that as the depth increases the soil temperature tends to the annual average temperature of the place (T_m in equation (4) and 19.9 °C measured in the considered time period). In fact a temperature annual gap around 20 °C in the surface becomes only around 5 °C at 4.80 m depth.

Figure 3.12 shows for the same time period the average daily temperatures at different depths (from 1 m to 4.8 m). Notice the sinusoidal profile as we have explained in Section 2 of this chapter and how just 4.80 meters deep, soil temperature is close all year to the annual average temperature in the place (19.9 °C). Note also the timing difference (phase shift) between sinusoidal functions which is due to the soil thermal inertia. This is also applicable to figure 3.11 in the sense that the behavior of a surface average monthly temperature does not correspond with that expected for this month as the depth increases.
As we can observe in figure 3.12 the sinusoidal profile regarding depth is each time better, which indicates that the influence of the surface weather decreases with depth, so the temperature profile is each time softer and closer to a sinusoid. This is also applicable to figure 3.11.

3.4.1 Calculation of the Actual Ground Thermal Diffusivity

In order to probe the power and usefulness of the developed methodology and system we have entrusted to a specialized company preparation of a geological report of the soil in the experimentation place regarding depth. This report asserts that from surface to a 4.80 depth there are five different kind of soil. In particular at 4.80 m depth the soil is a mix of sand and gravel. Moreover, the report asserts that the ground water level is 5.20 m depth so at 4.80 m the soil is wet.

Figure 3.13 (our own elaboration from [124]) shows thermal conductivity, volumetric heat capacity and thermal diffusivity for different kinds of soil. With the help of figure 3.13 and the data obtained in the geological report we must decide the ground thermal diffusivity coefficient to use. However, depending on the amount of humidity and the mix of gravel and sand the range varies from $0.19 \times 10^{-6}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$ to $1.72 \times 10^{-6}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$. It is clearly too high a range to decide without any further criteria.

At this stage it is where we see the power and usefulness of the developed methodology and

Rock Type	Thermal Conductivity (W/mK)			Volumetric Heat Capacity (MJ/m^3K)	Thermal Diffusivity (10^6 m^2/s)		
	Min	Typ	Max		Min	Typ	Max
Basalt	1.3	1.7	2.3	2.6	0.5	0.65	0.88
Greenstone	2	2.6	2.9	2.9	0.69	0.90	1
Gabbro	1.7	1.9	2.5	2.6	0.65	0.73	0.96
Granite	2.1	3.4	4.1	3	0.7	1.13	1.37
Peridotite	3.8	4	5.3	2.7	1.41	1.48	1.96
Gneiss	1.9	2.9	4	2.4	0.79	1.21	1.67
Marble	1.3	2.1	3.1	2	0.65	1.05	1.55
Mica schist	1.5	2	3.1	2.2	0.68	0.91	1.41
Shale sedimentary	1.5	2.1	2.1	2.5	0.6	0.84	0.84
Limestone	2.5	2.8	4	2.4	1.04	1.17	1.67
Loam	1.5	2.1	3.5	2.3	0.65	0.91	1.52
Quartzite	3.6	6	6.6	2.2	1.64	2.73	3
Salt	5.3	5.4	6.4	1.2	4.42	4.5	5.33
Sandstone	1.3	2.3	5.1	2.8	0.46	0.82	1.82
Siltstones and argillites	1.1	2.2	3.5	2.4	0.46	0.92	1.46
Dry gravel	0.4	0.4	0.5	1.6	0.25	0.25	0.31
Water saturated gravel	1.8	1.8	1.8	2.4	0.75	0.75	0.75
Dry sand	0.3	0.4	0.55	1.6	0.19	0.25	0.34
Water saturated sand	1.7	2.4	5	2.9	0.59	0.83	1.72
Dry clay/silt	0.4	0.5	1	1.6	0.25	0.31	0.62
Water saturated clay/silt	0.9	1.7	2.3	3.4	0.26	0.5	0.68
Peat	0.2	0.4	0.7	3.8	0.05	0.10	0.18

Figure 3.13. Thermal conductivity, volumetric heat capacity and thermal diffusivity for different kinds of soil

system (even more if we had not geological report). Thus, from equation (8), with T_m (19.9 °C) and T_p (12 °C) measured in the place and with T_H (22.5 °C) measured by GTP, we can calculate the real ground thermal diffusivity value to 4.80 m depth. This is:

$$\alpha_z = \frac{\pi}{T}\left(\frac{z}{\ln\frac{T_p}{T_H - T_m}}\right)^2 = \frac{\pi}{3.1557 \times 10^7}\left(\frac{4.8}{ln\frac{12}{22.5 - 19.9}}\right)^2 = 0.98 \times 10^{-6}\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}} \quad (9)$$

The result corresponds, as we can expect, with a mixed sand and gravel soil and with a determined moisture grade. This composition and soil state is irrelevant to us (for this application), because what really matters is the value of α_z to 4.80 m depth ($\alpha_{4.80}$).

3.5 CONCLUSIONS

This chapter tries to reflect a couple of year of work of studying, analyzing and experimenting with soil temperature measures in order to find a practical and low cost way to dispose of the soil principal variable measurements (temperature and ground thermal diffusivity) to design VLEGE systems in a proper way. The studies conducted and conclusions reached are not only applicable in VLEGE systems for MEB in subtropical climate, but also in agriculture, biology, etc.

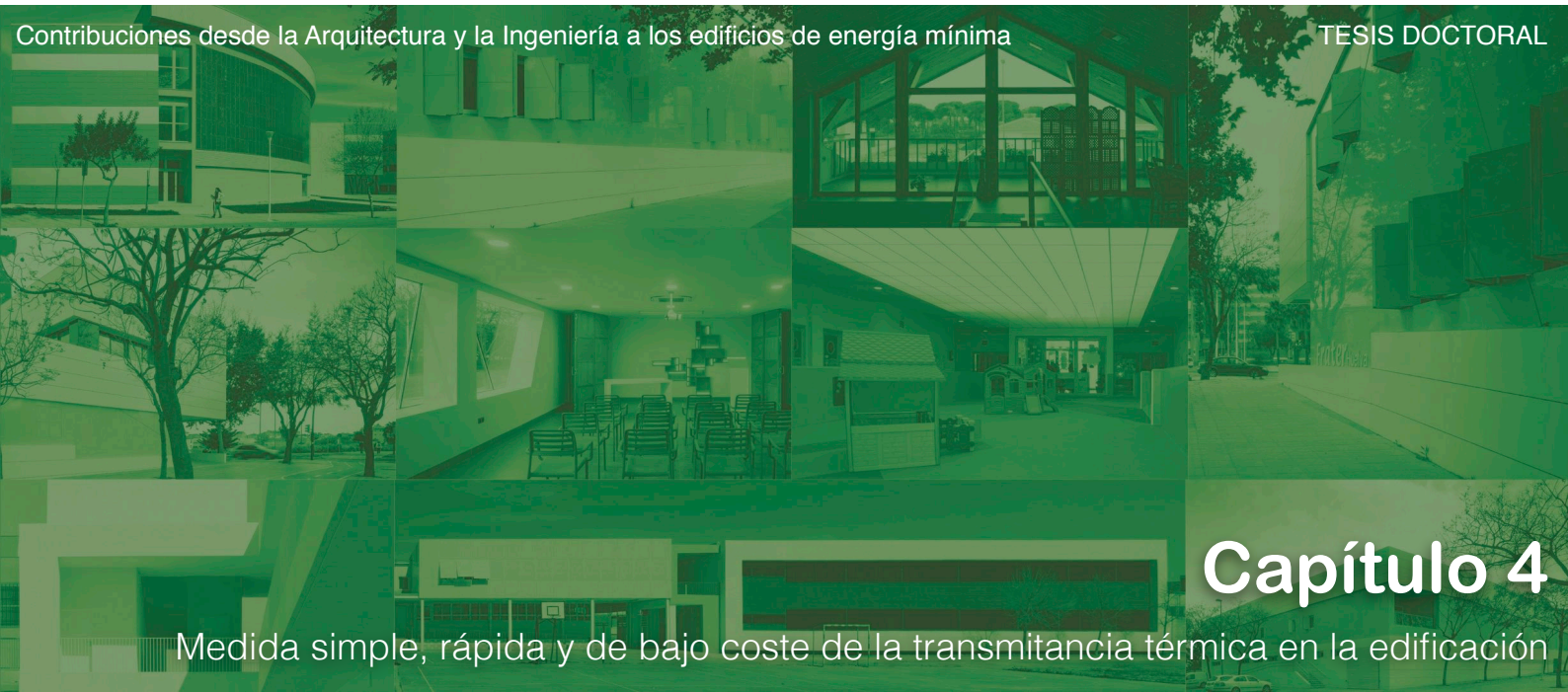
Focusing on VLEGE systems, the fluid/ground heat exchange lies in the fact that the temperature difference between the incoming fluid (e.g., air) and the ground varies during the year and depends on the depth to which the collector (pipe) is buried. The amplitude of the ground temperature variation decreases exponentially with depth and it tends to stabilize to the average temperature of the place, therefore at greater depth higher heating/cooling gain.

The methodology and instrumentation system developed in this work can be a useful tool for architects, geologists and engineers, since it gets the real values of the soil variables contrary to exclusively theoretical or empirical methodologies. Incorrect sizing of the VLEGE facility cause malfunction and poor performance of the heat pump. This is a serious problem: dig up collectors and change them is expensive and sometimes, depending on the characteristics of the facility, impossible. Consequently, this may result in the need to use external heating/cooling, which call into serious question the energy efficiency of the facility.

It seems that in an actual construction work is not always possible to perform a one year long ground temperature measurement campaign. This is true, however by observing figures 3.3 and 3.12 is easily verified that is not necessary. The sinusoidal behavior of the soil temperature implies that one needs only a part of the function to rebuild it fully. Really one only needs to get data around T_H or T_L and it is easy because you know (in basis on the timing difference or phase shift between the maximum/minimum soil temperature at chosen depth and on the surface) the days of the year when that will happen.

This work is an applied example of the strong possibilities of instrumentation and data analysis for making more energy efficiency buildings. In the next chapter of this thesis, we will introduce another applied example of instrumentation for improving energy efficiency in buildings, with climate, indoor air temperature, indoor air humidity, energy consumption, energy production and others, data acquisition sensors full connected to a data analysis software, available on-line.

In the next chapter of this thesis, we will introduce instrumentation and data analysis as the better way to validate the real performance of an MEB. As well, we expose a new methodology to estimate U, a decisive factor for external enclosure characterization.



Capítulo 4

Medida simple, rápida y de bajo coste de la transmitancia térmica en la edificación

4. MEDIDA SIMPLE, RÁPIDA Y DE BAJO COSTE DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA EN LA EDIFICACIÓN

Este cuarto capítulo de esta tesis doctoral desarrolla una metodología y un sistema de instrumentación para la medición simple, rápida y de bajo coste de la transmitancia térmica (*U-Value*) de la envolvente de un edificio. La metodología y el sistema desarrollado han sido probados y utilizados en la toma de datos realizada para los trabajos descritos en los capítulos 5 y 6 d esta tesis doctoral. Se trata de una aportación de interés específico en la construcción y la rehabilitación energética de MEB en clima subtropical.

En el contexto específico de la rehabilitación energética de edificios, la medición, procesamiento e interpretación de las variables de interés (temperatura y humedad relativa exteriores e interiores, radiación solar, consumo y producción de energía diferenciados por circuitos, *U-Value, etc.*), juegan un papel fundamental. Los sistemas de adquisición de datos permiten conocer las medidas de las variables de interés para la rehabilitación energética tanto antes (para la toma de decisiones sobre el tipo de rehabilitación energética a ser realizada), como después (para evaluar el resultado de la rehabilitación energética y conocer de manera fiable la mejora obtenida).

Este capítulo se dedica a la instrumentación de una de estas variables, quizás la más compleja a medir, el *U-Value*. Para ello, se ha desarrollado un novedoso sistema inalámbrico, que proporciona una medición simple, rápida y barata de los valores de *U-Value* de las envolventes térmicas de los edificios.

El medidor de *U-Value* desarrollado incorpora una interfaz de usuario (implementada por un instrumento virtual) para su manejo remoto. Recibe mediciones en tiempo real, los procesa y los almacena. Permite detectar errores de comunicación y fallos en los sensores, y advertencias de las anomalías. Finalmente, mediante el medidor de *U-Value* desarrollado, el usuario puede realizar gráficos e informes. Una vez que se colocan los sensores de temperatura, ningún proceso de obtención de las mediciones requiere intervención humana.

El capítulo 4 de esta tesis doctoral está organizado de la siguiente manera: en la sección 1 se realiza una introducción específica de este capítulo. En la sección 2 se presenta la metodología de medición, esto es, el desarrollo matemático del sistema desarrollado. La sección 3 se describe minuciosamente el medidor de *U-Value* desarrollado, tanto en lo que respecta al *hardware* como al *software*. En la sección 4 se muestra la manera concreta de tomar las medidas y los resultados de las mismas. Igualmente se destacan las principales características y cualidades del medidor de *U-Value* desarrollado, con respecto a la tecnología existente en la actualidad. Finalmente, las principales conclusiones se describen en la sección 5.

Tratándose de una tesis doctoral con mención internacional, el desarrollo del capítulo 4 que se expone a continuación, se realiza íntegramente en inglés.

4.1. INTRODUCTION

The reduction of energy demand is the easiest way to limit the production of greenhouse gases. It is possible with change of behavior or with higher energy efficiency. The energy demand of buildings (houses, public and private offices, shops and other buildings) represents a very important part of the European Union's (EU) final energy consumption [125-127], nearly 40%, and it is expected to continue to grow in the coming years. By 2030 the European Union will depend on 90% of oil imports and 80% on natural gas to cover its needs. Improving the energy efficiency of buildings, responsible for one-third of greenhouse gas emissions, would not only save costs but also partially offset the impact of climate change [128]. The European

Union's Horizon 2020 framework program emphasizes the need to reduce the difference between calculated and actual performance of buildings by increasing their energy efficiency [129]. Usually, the energy consumption in buildings is conditioned by the use and maintenance of their facilities, as well as their constructive characteristics (mainly insulation).

Regarding thermal comfort, it depends on many factors, including personal (physiological, sociocultural, etc.) and environmental. To achieve a certain level of thermal comfort two sets of actions can be carried out: passive (referred to the building envelope) and active (heating and cooling systems).

While it is true that new buildings are subject in the developed countries to strict constructive norms to achieve high energy efficiency, it is also true that in these countries and in general, in all, there is a huge building park that were built with less demanding criteria (depending on their age, perhaps with none). This huge amount of existing buildings needs to be energy retrofitted to achieve levels of efficiency those are in line with current requirements.

It is estimated that if a good building energy retrofitting is carried out, up to 27% of energy savings can be achieved [130]. Based on our own experience the result can be even better, depending of course on the initial state of the building and the extent and quality of retrofitting conducted.

In the context of building energy retrofitting, the measurement, processing and interpretation of the variables of interest play an important role. Usually this is done with specific data acquisition systems (DAQs). They allow to know the measures of the variables of interest both before (to assess the retrofitting to be carried out) and after (to evaluate the retrofitting result and to know in a reliable way the improvement obtained) the retrofitting. In general, measurements of temperature [131-134] and relative humidity [135, 136] both indoor and outdoor, solar radiation [137, 138], envelope thermal transmittance (*U-Value*) [139, 140], power consumption by circuits [141], etc., are required.

This work is devoted to the measurement of one of these variables, perhaps the most complex to measure, the *U-Value*. For this, a novel wireless measurement system has been developed, which provides simple, quick and cheap measurement of *U-Values* in buildings.

The better-insulated a structure is, the lower the *U-value* will be. *U-value* (reciprocal of thermal resistance, R_t *value*) is the rate of transfer of heat through a structure (which can be a single material or a composite), divided by the difference in temperature across that structure. The units of measurement are W/m²K. Currently, the three most common methods for measuring the *U-Value* in buildings, although there are other [142, 143], are:

(a) Theoretical calculation using the ISO 6946: 2007 standard [144-146]. The procedure may be invasive (making coves in the building envelope) or not, and it is necessary to take into account the thickness of each of the layers that compose the building envelope, as well as its thermal conductivity, which is calculated according to ISO 10456: 2007 standard [147]. This method is approximate and the obtained *U-Value* is often far from the actual [148-150].

(b) Based on the direct measurement of the heat flux through the building envelope, according to ISO 9869: 2014 standard [151]. For this, a flow heat meter and a pair of temperature sensors [152] are used. The *U-Value* measurement must be performed once steady state has been reached, i.e., the average heat flow on both envelope sides must be equal in a long-enough period of measurement.

(c) Measured by the ITT (Infrared Thermovision Technique) method, which consists of the calculation of the *U-Value* through measurements made with a thermographic camera and the subsequent analysis of the images obtained [153-155].

Of the three methods above, the most accepted for its accuracy is (b). However this way to measure the *U-Value* is very tedious, time consuming and expensive for the following reasons:

1. The duration of the test must exceed 3 days taking up to 7 to 14 days or even more than a month for heavy structures; or over a year in the case of a ground floor slab, due to heat storage in the ground.

2. If we try to apply this method in building energy retrofitting and, as usual, the number of measures to be performed is high, its application is not feasible. We would need months or years to carry out the measurements, or a large number of equipment measuring at the same time.

3. The accuracy of measurements depends on a number of factors:

    - Magnitude of temperature difference (larger = more accurate).
    - Weather conditions (cloudy is better than sunny).
    - Good adhesion of the head flow sensor to test area.
    - Duration of monitoring (longer duration enables a more accurate average).
    - More test points enable greater accuracy, to mitigate against anomalies.

4. The heat flow meter is a relatively expensive and unstable device, as well as needing a specific instrumentation channel.

The developed system aims to avoid all mentioned problems, providing in an easy way a quick and cheap *U-Value* measurement. The employed measurement methodology is derived from (b); it consists of the direct measurement of the *U-Value* but without using a flow heat meter. Specifically, only the measurement of three temperatures is required: environment on each face of the structure and surface on one of them. The temperature sensors used have been patented by the *Control y Robótica* Research Group [156, 157], although others may be employed.

Regarding the duration of the test, according to method (b), all the mentioned time periods (3 days taking up to 7 to 14 days or even more than a month for heavy structures; or over a year in the case of a ground floor slab) are

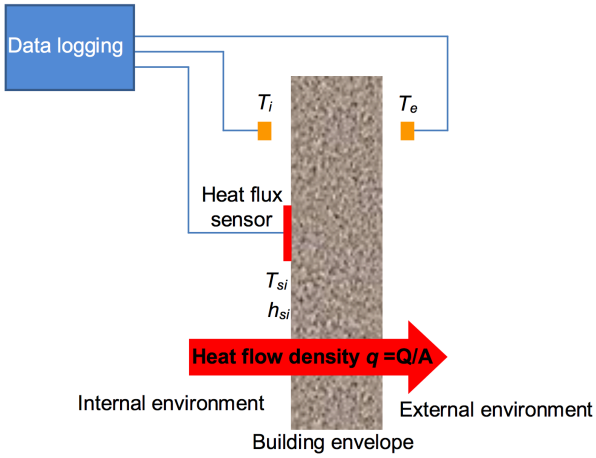


Figure 4.1. In-situ *U-Value* measurement according to ISO 9869: 2014 standard (average method)

estimated from a conservative point of view, in the sense that experience advises these time periods to ensure the quality of the measure in any case. However, based on our own experience, the most important factor to perform a good measure of the *U-Value* is not so much the time during which it is being measured, but the time it takes the measurement to stabilize. Actually the casuistry in the measure is very varied, depending mainly on the thermal gradient interior / exterior and the nature of the structure; therefore it would be very important to have a system that at all times was able, based on the above, to decide when a measure is correct (it is stabilized) and when not. This would allow fitting the measurement time in each case, opening the possibility of taking more measures in less time and therefore generating a significant saving. This is precisely another of the most important features of the developed system: if during a user-adjustable time the measurement remains stable within a threshold also user-adjustable, the system automatically takes the measurement and ends the test. This is possible because our system works online, processing data in real time; the known commercial systems work offline, as data loggers.

The developed *U-Value* meter allows taking multiple measures at the same time, which allows considerably cutting the time needed to have a suitable set of measures in a retrofitting of an existing building. In fact is fully modular

and configurable by the user according to your needs.

The developed *U-Value* meter incorporates a user interface implemented by a virtual instrument (VI), for its remote handling. It receives real time measurements, processes and stores them. The VI allows detecting communication errors and failures in sensors, warning of the anomaly. Finally, by the VI the user can carry out graphs and reports. Once the temperature sensors are placed, no process of obtaining the measurements requires human intervention.

The rest of the chapter is organized as follows: in the following section the measurement methodology is presented, this is the mathematical foundation of the developed system. Section 3 is devoted to analyze the developed *U-Value* meter, both the hardware and software. In section 4 the way to take measurements and the results of thereof is shown, including the main features and qualities of the developed *U-Value* meter regarding the actual technology. Finally, main conclusions are outlined in Section 5.

4.2 MEASUREMENT METHODOLOGY

U-Value measures how effective a material is as insulator. Assuming a mono-dimensional heat flow and steady state conditions (Fig. 4.1), the *U-Value* of a system is defined as the heat flow rate per unit area, *q*, divided by the temperature difference between the surroundings on each side of the system. This is:

$$U\text{-}Value = \frac{q}{T_i - T_e} \qquad (1)$$

Were, if as usual, the system is a wall and a side of it is in the indoor and the other one on the outdoor, T_i and T_e are, respectively, the internal and external environment temperatures.

From the point of view of building construction, the *U-Value*, assuming steady state conditions, is the amount of heat flowing per unit of surface through a specific building envelope when there is a temperature gradient between the indoor and outdoor environment. Following (1), the ISO 9869: 2014 [151] standard for measuring the *U-Value* (Fig. 4.1) requires two temperatures sensors and one heat flow meter on the side with the most stable temperature, usually indoor. The heat flow sensor (thermopile) should be in direct thermal contact with the surface of the envelope (usually a wall) over the whole area of the sensor. Regarding the temperature sensors, they must measure the air temperature (not the envelope surface temperature). The steady-state assumption implies that only one heat flow meter is enough, since the average heat flow on both sides are equal in a long-enough period of measurement.

Acquired measurements data are processed by using the progressive average procedure, it is based on the idea that the average of instantaneous ratios between heat flux and temperature differences on a progressively increasing time scale, smoothies out the oscillations leading to the steady-state value of the thermal transmittance. The equation that describes the procedure is:

$$U\text{-}Value\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}\right) = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_{(j)}}{\sum_{j=1}^{n}\left(T_{i(j)} - T_{e(j)}\right)} \qquad (2)$$

In order to find a more practical way of measuring the *U-value*, we can use a methodology based on the Newton's law of cooling. This states that the rate of heat loss of a body is directly proportional to the difference in the temperatures between the body and its surroundings. The proportionality constant is called convective heat transfer coefficient. Newton's cooling law in convection is a restatement of the differential equation given by Fourier's law:

$$\frac{dQ}{dt} = h\,A\left(T_s - T_{env}\right) \qquad (3)$$

Where:
Q is the thermal energy in joules.
h is the convective heat transfer coefficient (W/(m^2 K))
A is the heat transfer surface area (m^2)
T_s is the temperature of the object's surface and interior (since these are the same in this approximation)
T_{env} is the temperature of the environment.

The convective heat transfer coefficient *h* depends upon physical properties of the body and the physical situation in which convection occurs.

According to Fig. 4.1 and taking into account (1) and (3) in stationary state, we can write for a building envelope that

$$q = U\text{-}Value\left(T_i - T_e\right) = h_{si}\left(T_i - T_{si}\right) \qquad (4)$$

Where h_{si} is the indoor surface convective heat transfer coefficient of the building envelope, T_{si} its indoor surface temperature and we have considered that the building is losing heat through its envelope. Then, from (4),

$$U\text{-}Value = h_{si}\,\frac{T_i - T_{si}}{T_i - T_e} \qquad (5)$$

Finally, by following the progressive average procedure in order to lead to the steady-state value of the thermal transmittance,

$$U\text{-}Value\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}}\right) = h_{si}\,\frac{\sum_{j=1}^{n}\left(T_{i(j)} - T_{si(j)}\right)}{\sum_{j=1}^{n}\left(T_{i(j)} - T_{e(j)}\right)} \qquad (6)$$

Known the building envelope h_{si}, (6) allows obtaining its *U-Value* by measuring three temperatures (Fig. 4.1), namely: T_i, T_e and T_{si}. The h_{si} values can be obtained from [9]: h_{si} = 5,0 (W/m^{2}K) for heat flow upwards; h_{si} = 2,5 (W/m^{2}K) for heat flow horizontal and h_{si} = 0,7 (W/m^{2}K) for heat flow downwards. Regarding these h_{si} values there is certain dispersion depending on the bibliographical sources. In any case and regarding our methodology this is no problem because we make differential measures, i.e., we measure before and after the building energy retrofitting, and then we subtract the measures in order to get the obtained improvement.

In practice, in order to minimize errors in the envelope surface temperature measurement, it is advisable to carry out several measuring at the same time around the measurement zone. Specifically and based on our own experience, it is a good practice to take three measurements in points spaced about 10-15 cm from each other. In this way, the chosen T_{si} to introduce every time in (6) will be the average of these three measures.

4.3 DEVELOPED U-Value METER

The design of the developed *U-Value* meter is fully modular and also its use. It is made up different modules that the user can configure according your need (Figure 4.2). The indoor and outdoor modules are physically separated but connected via wireless. All modules function as *Xbee* devices using *Zigbee* protocol [158, 159].

Xbee is a small (about 2 cm^2), low-power (tens of mW) digital radio. Since its initial introduction (2005), a number of new *XBee* radios have been developed and an ecosystem of wireless modules, gateways, adapters and software has evolved. This allows today that, through a *Xbee* device, any small single-board computer can be integrated in specific purpose wireless networks. Regarding *ZigBee*, it is an IEEE 802.15.4-based specification [160, 161] used to create personal

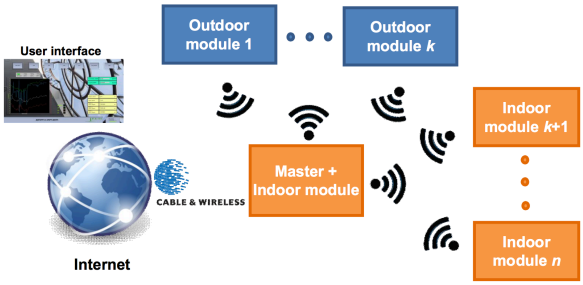


Figure 4.2. Developed *U-Value* meter

area networks. The technology defined by the *ZigBee* specification is intended to be simpler and less expensive than other wireless personal area networks such as Bluetooth or Wi-Fi.

Depending on the *XBee* device used, the combination *XBee + ZigBee* allows a communication range of more than 100 m in closed spaces and 1 km in open spaces. In any case, *ZigBee* devices can transmit data over long distances by passing data through a mesh network of intermediate devices to reach more distant ones. This feature is implemented in our developed *U-Value* meter.

Taking into account that a *ZigBee* network can consist of a maximum of 65535 nodes distributed in subnets of 255 nodes, the ability of the developed *U-Value* meter, according to the configuration of Figure 4.2, is practically unlimited, and certainly higher than any practical requirements in field.

If on a building you need take an only *U-Value* measurement, the configuration of the Developed *U-Value* meter is the simplest: the *Master + indoor* module and one *outdoor* module. Following Figure 4.1, The *Master + indoor* module takes the temperatures T_i and T_{si} (three measurement points) and the *outdoor* module takes the temperature T_e. The *Master + indoor* module picks up all the measures, processes them following (6) and save (in an internal memory) de calculated *U-value*. At the same time can be transmitting all measures in real time to internet via cable, Wi-Fi or wireless (even using mobile phone network or a modem radio). In our case, we can receive in our laboratory all the real time measures from any building at any part of the world. For that we have developed a user interface (by a VI) as part of the developed *U-Value* meter. Of course, data can be also stored in situ, by a USB memory device in the *Master + indoor* module. From this initial and simplest configuration, the user can scale the developed *U-Value* meter according to your needs, i.e., adding as many *indoor* and *outdoor* modules as you need. Taking into account the distance range and capabilities of incorporating modules, you can be monitoring entire blocks of buildings with the same *U-Value* meter. And, what is so important or more, all measures can be done at once and have their values in real time.

4.3.1. Master + indoor module

The block diagram of this module is shown in Figure 4.3. It is based on a small single-board computer *Raspberry Pi 3* [138, 162]. In addition to the *Raspberry Pi* 3, the *Master + indoor* module has built-in a *Dongle Xbee + XBee* device (*Xbee S1 Pro*, [163]), an AC/DC power supply and a board were the temperature sensors are connected. It allows connecting the 1-wire bus, used with the temperature sensors (for measuring T_i, and 3 T_{si}), to the *Raspberry*. Finally, although the measures can be transmitted in real time to any point with internet connection, these are also stored in an external USB memory device (32 GB in this prototype), which allows the measures recovering if any connection failure occur. This USB memory device can be removed by the user.

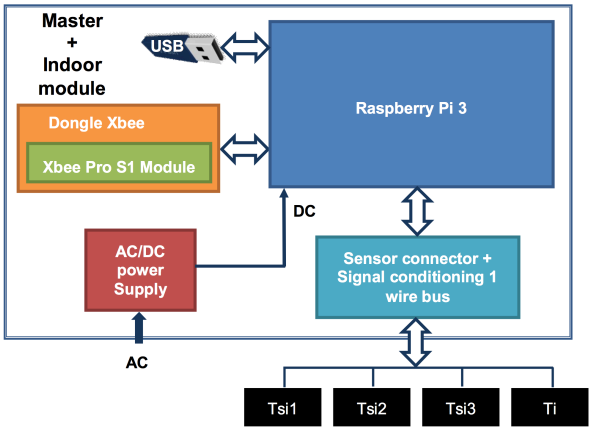


Figure 4.3. *Master + indoor module* block diagram

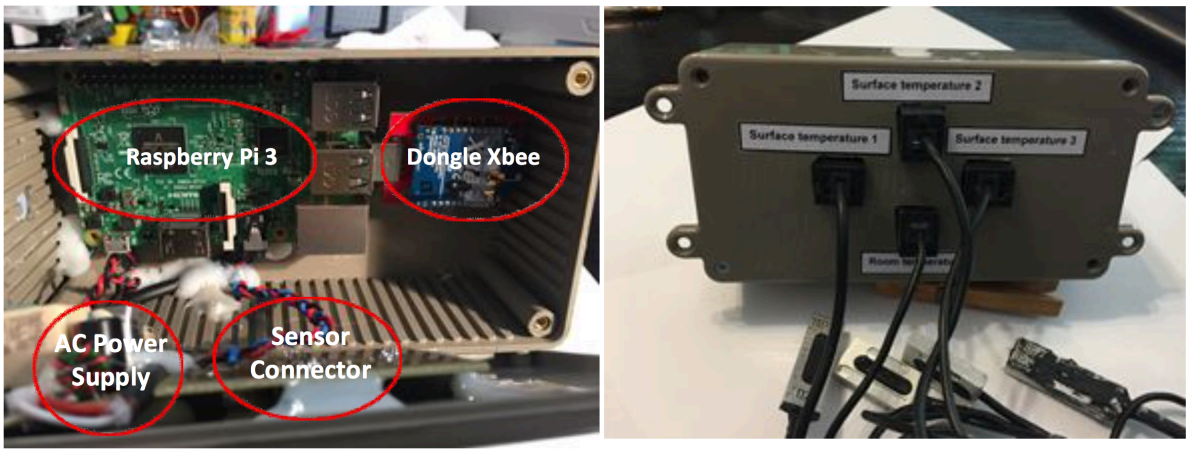


Figure 4.4. *Master + indoor module* prototype: Internal (left) and external (right) views, with its four temperature sensors

Figure 4 shows the actual built module. The *Master + indoor* module is housed in a plastic box which can be plugged directly into a 230 V AC electrical wall outlet and operates in plug and play mode. The cost of this prototype is around 150 €. This price only takes into account the cost of materials; in terms of labor, has been carried out by hand, in an artisan way. Of course, for industrial production the costs would be greatly reduced.

4.3.2 Indoor module

The block diagram of this module is shown in Figure 4.5. It is based on a microcontroller board *Arduino Uno* [164-166]. Because this module needs less computing requirements than the *Master + indoor module* (since it will always act as its slave), we have decided to use an *Arduino Uno* instead of a *Raspberry Pi 3*. The fundamental difference between both is that *Raspberry Pi* is a fully functional computer, whereas *Arduino* is essentially a microcontroller. In addition to the *Arduino Uno*, the *indoor module* has built-in a *Shield Xbee + XBee* device (*Xbee S1 Pro*), a *watch-dog circuit* (automatically resets the module in the event of communication blocking, which occurs with certain frequency in this kind of devices), an AC/DC power supply and a board were the temperature sensors are connected. It allows connecting the 1-wire bus, used with the temperature sensors (for measuring T_i, and 3 T_{si}), to the *Arduino Uno*.

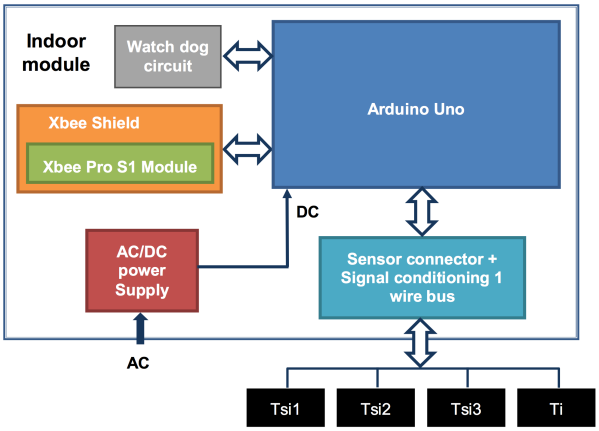


Figure 4.5. *Indoor module* block diagram

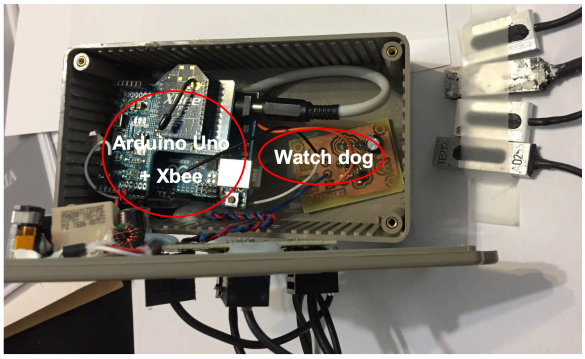


Figure 4.6. *Indoor module* prototype with its four temperature sensors (top right)

Figure 4.6 shows the actual built module. The *Indoor module* is also housed in a plastic box which can be plugged directly into a 230 V AC

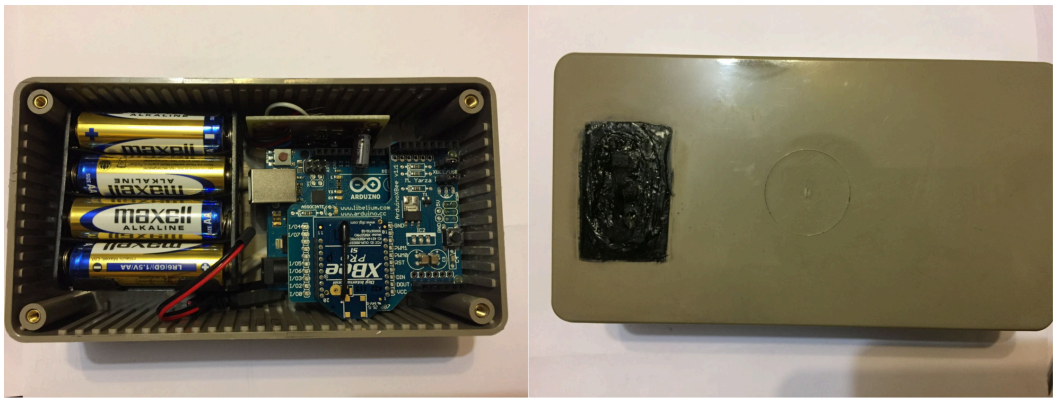


Figure 4.7. *Outdoor module* prototype (left) and its weather protected temperature sensor (right)

electrical wall outlet and operates in plug and play mode. The cost of this prototype is around 90 €. As in the previous module, this price only takes into account the cost of materials.

4.3.3 Outdoor module

This module is essentially analogous to Indoor module (Figure 4.5), with the exception that it has a single temperature sensor (T_e) integrated in the box itself, weather protected; and it uses its own battery power source (Figure 4.7).

4.3.4 User interface

The user interface has been carry out by a VI created in *LabView*. This VI receives the real time measurements, processes and stores them. The developed VI allows detecting communication errors and failures in sensors, warning of the anomaly. Finally, by the VI the user can carry out graphs and reports.

Figure 4.8 shows the front panel of the developed VI taking measures. Its use is very intuitive and simple, and it notifies the user when the *U-Value* is available. Its measurement is done automatically and without the intervention of the user, i.e., if during a user-adjustable time the measurement remains stable within a threshold also user-adjustable, the developed *U-*

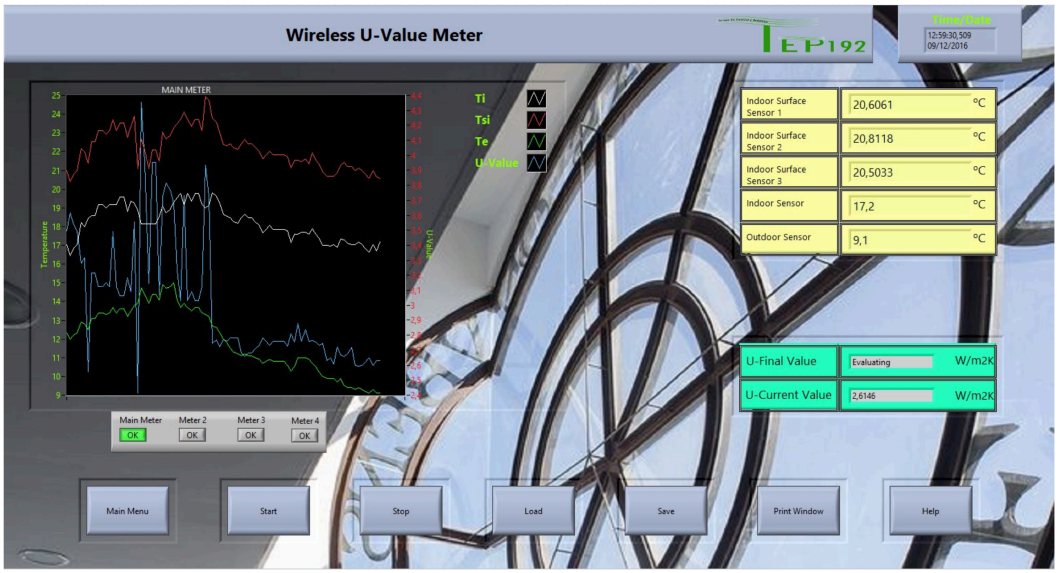


Figure 4.8. User interface front panel

Value meter automatically takes the measurement and ends the test.

4.4 TAKING MEASUREMENTS AND RESULTS

Initially and as specified in standard [151], a preliminary inspection of the wall to be measured with thermographic camera must be carried out. The reason is to avoid points where there could be a thermal anomaly, such as a thermal bridge.

As shown in Figure 4.9, the three surface temperature sensors (the separation between them is about 10-15 cm) are adhered by heat-conductive adhesive to the wall to be measured. This allows taking an average measure ($T_s = (T_{s1} + T_{s2} + T_{s3})/3$) that is closer to the actual of the wall. T_{si} is automatically calculated by the Master + indoor module. Regarding the indoor temperature sensor (T_i), it is placed 30 or 40 cm from the wall, at the height of the others (in closed and inhabited rooms, there is usually a thermal gradient between the floor and the ceiling, whereby the ambient temperature is not the same at different heights). All temperature sensors have digital output in 1-Wire format [167].

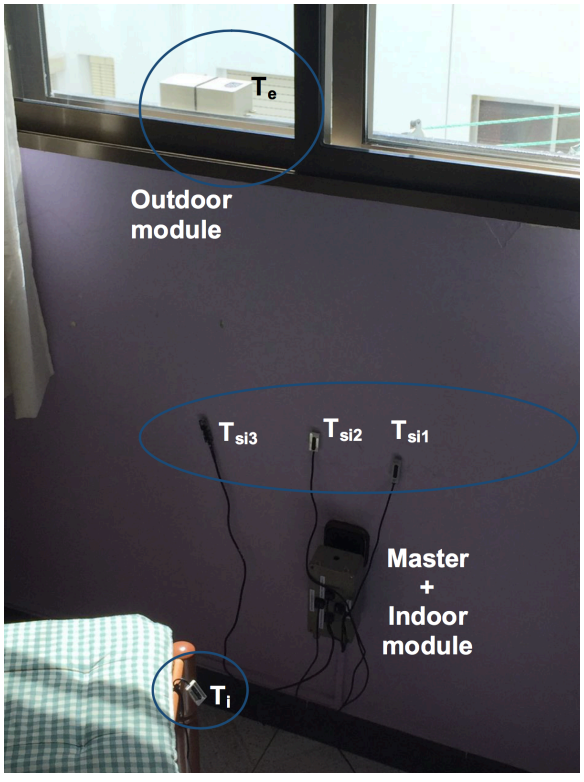


Figure 4.9. *U-Value* meter assembly

The *outdoor module* is placed on the other side of the wall; in this case out of the housing. As we have already explained, its function is to take the external environment temperature, so it can be placed in the most comfortable place; taking into account that the measured temperature will be the same at different heights (of course within small distances and avoiding changes of sun and shadow).
Once all the temperature sensors are placed, just need plugging the *Master + indoor module* into the electric current and automatically start measuring. The developed *U-Value* meter transmits the data, and at the same time processes and save them in the USB memory device.

The *U-Value*, in order to be valid, must be carried out according to standard ISO 9869-1:2014 [151]: the temperature difference between indoor and outdoor must be greater than 10 °C, the wind speed less than 3 m/s and the solar radiation received must not be direct or high.

The described assembly must be repeated for each measurement point, but only using *indoor* and *outdoor modules*; just program the number of measurement points in the VI.

4.4.1 Results

As example, Figure 4.10 shows the measures in a house before its energy retrofitting. The measured *U-Value* was 2,61 W/m²K. After the energy retrofitting, which consisted of an external insulation and finish system (EIFS), the results were those of Figure 4.11. The *U-Value* had dropped to 0,41 W/m²K. Therefore, the improvement was 2,2 W/m²K.

As can be seen in Figures 4.10 and 4.11, in this example the developed *U-Value* meter has taken the properly measures in about 10-11 hours. Both the time where the measurement remains stable and its threshold have been adjusted following our experience.

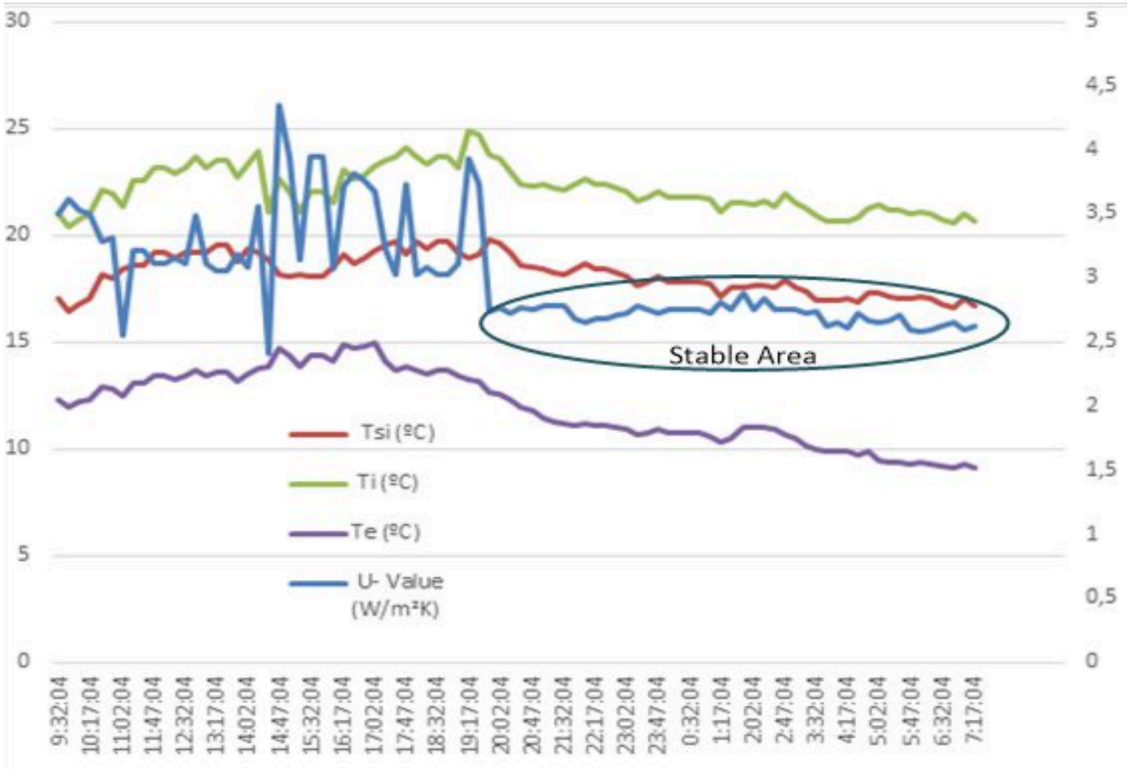


Figure 4.10. Measures taken with the developed *U-Value* meter before the energy retrofitting

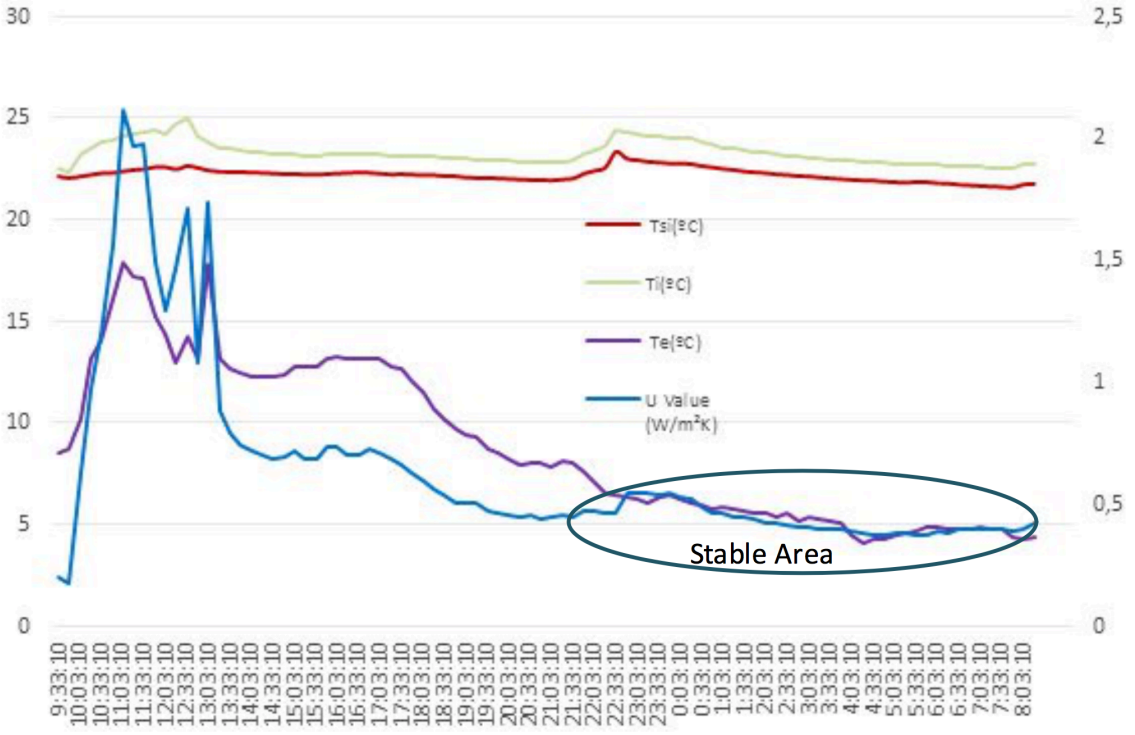


Figure 4.11. Measures taken with the developed *U-Value* meter after the energy retrofitting

4.5 DISCUSION

In new or under construction buildings, with the knowledge that we have today of the construction materials, as well as with the increasingly demanding regulations in the countries, the need to measure *U-Value* in the envelope of a building is usually punctual. However, all countries have huge building parks that were built with less demanding regulations (depending on their age, perhaps with none). This huge amount of existing buildings needs to be energy retrofitted to achieve levels of efficiency those are in line with current requirements. It is precisely in this field, the one of energy retrofitting, where the *U-Value* knowledge is most needed and its measure must be carried out, generally, at particular housing level and even with several measures in each one.

When you need to take many measures of *U-Value* in buildings in a short time, the methodology based on the direct measurement of the heat flux through the building envelope is impractical. By this methodology, probably the only way to take many measures in a few days is to be working with as many devices at once as measures are necessary. The proposed methodology in this work, and the developed *U-Value* meter which allows it to be carried out, resolves this problem. As we have showed in this paper and regarding the existing devices, our developed *U-Value* meter improves the current technology in the following aspects:

- It has a modular structure.
- Based on the previous one, it is made up of different modules that allow configuring it as the customer needs.
- The modules connection is extremely easy; you do not need any cable. All connections are made by wireless and in plug and play mode.
- In spite of that the cost of the whole system is cheaper that existing devices, this cost may be even smaller, as it is only necessary to acquire the modules that are needed.
- It is capable to take more than one measurement at once. Really its capabilities are practically unlimited in this aspect. A *Master + indoor module* can be managing tens or hundreds of *indoor* and *outdoor modules*.
- The meter decides automatically when a *U-Value* measurement is correct, so the time spend is strictly the necessary, which allows shortening measurement times.
- Moreover, the user, based on his own experience, can set the correct measurements time and the *U-values* gap in it.
- The developed *U-Value* meter is provided of a friendly and ergonomic user interface.
- Independently of the installed modules, the developed *U-Value* meter acts as a single instrument, so it is able to manage all the measures at once and processed them as the user needs.
- The user interface, thanks to its VI, can present the information in different ways, as a data sheet or graphically.
- The devices present in the market process the data off-line, which further slows down the *U-Value* measure; the developed *U-Value* meter processes data in real time and provides the *U-Value* immediately.
- Measured data are saved in situ an also they are send by internet to any part of the world. In fact the user can govern the developed *U-Value* meter remotely.
- The internet connection of the developed *U-Value* meter can be made by cable, Wi-Fi, mobile phone network or even by modem radio.
- The mentioned features allow taking the necessary *U-Value* measurements in a large number of homes at once and in a short period of time. Today, with the current devices available in the market it is impossible.
- Finally, the developed *U-Value* meter is quite accurate. In fact, in any measurement made, despite not observing the time advised by the standard [151], the error has been always less than 2%. Not even this small error is a problem, since we make differential measures, i.e., we measure before and after the building energy retrofitting, and then we

subtract the measures in order to get the obtained improvement.

The thermal transmittance measure (*U-Value*) is mandatory in building energy retrofitting, since by means of the measurement before and after it, the specialist can check the quality of the building energy retrofitting carried out.

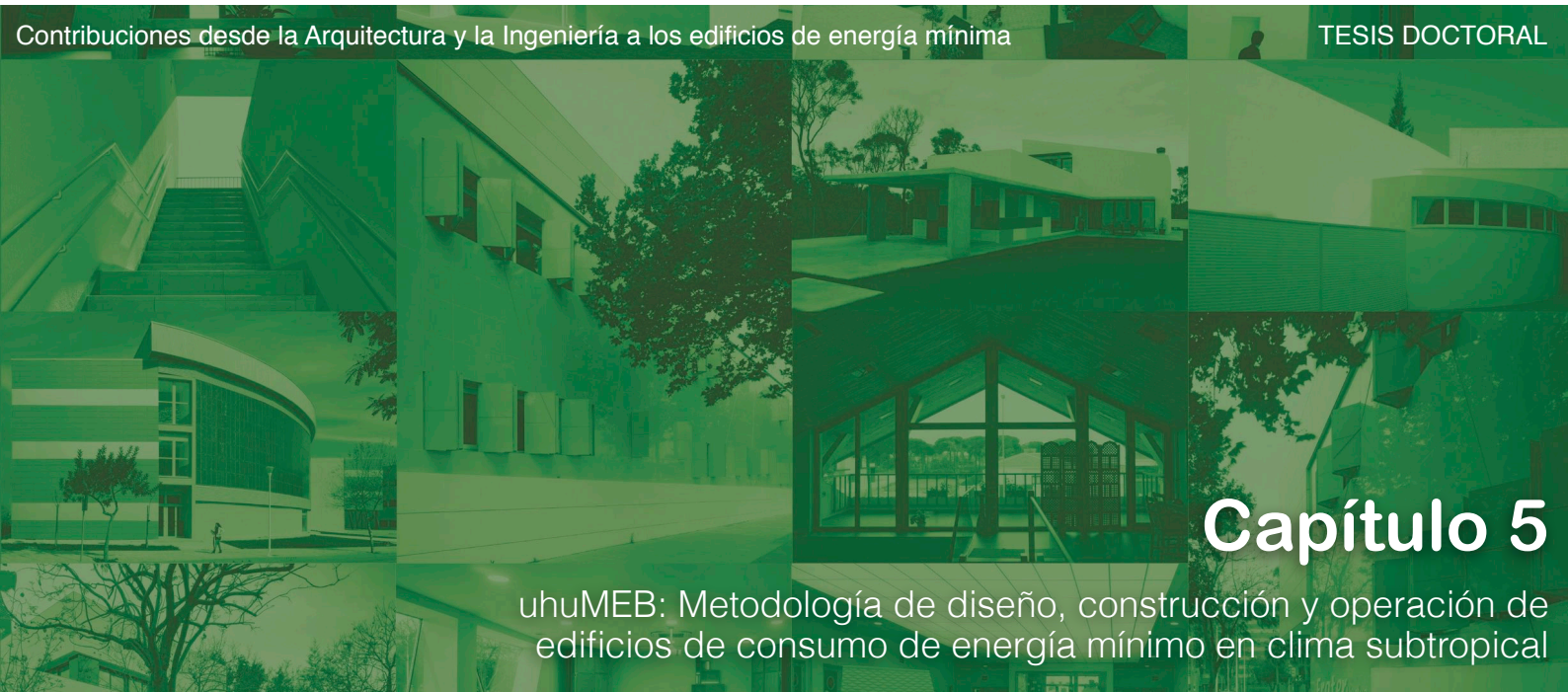
In this chapter a new *U-Value* meter has been presented. This device meets a series of qualities that make it ideal to be applied in building energy retrofitting. Today the market offers *U-value* meters whose application to building energy retrofitting can be expensive and probably impractical. As solution, our developed *U-Value* meter offers a simple, cheap and quick way to measure *U-Values*.

This fourth chapter of the thesis deals with the thermal transmittance measurement focused on buildings and specifically in building energy retrofitting. Today, if many measures in a short time are needed, the current devices cannot carry out them, except if a great amount of devices are used at once along with intensive and tedious post-processing and analysis work. In this chapter, from well-known physical laws, it is developed a new methodology based in three temperatures measurements, which is implemented by a novel thermal transmittance meter.

4.6 CONCLUSIONS

The chapter shows its development step by step. As a result, the developed device is modular, scalable, full wireless and it is able to perform as many measurements at once as the user needs. In conclusion, this part of the thesis shows a simple, cheap and quick way to measure building envelope thermal transmittance.

In the next chapter of this thesis, we discuss how to undertake in a sequential and orderly way a negotiation, project, construction and operation strategy for developing a MEB. All the instrumentation work developed in this and the prior chapter will be applied in fifth and sixth chapter experimental cases for a new construction building (*Casa Zaranda*) and a retrofitted building (*Casas del Carmen*).



Capítulo 5

uhuMEB: Metodología de diseño, construcción y operación de edificios de consumo de energía mínimo en clima subtropical

5. uhuMEB: METODOLOGÍA DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE EDIFICIOS DE CONSUMO DE ENERGÍA MÍNIMO EN CLIMA SUBTROPICAL

En este quinto capítulo proponemos una metodología estructurada para la correcta toma de decisiones durante la negociación inicial, el proyecto, la construcción y la fase de operación de un MEB en clima subtropical. Se trata por tanto de una aportación fundamental, por cuanto viene a rellenar en parte una de las carencias identificadas en el análisis del marco normativo realizado en el capítulo dos.

Esta nueva metodología incorpora la instrumentación y el análisis de datos como elemento esencial que da soporte a la validación de los resultados obtenidos durante la fase de ejecución del edificio. Y es que anticipar los resultados en fase de proyecto, apoyándose en herramientas de simulación energética por software, no es suficiente si estos resultados no quedan corroborados por las pruebas de funcionamiento durante al menos el primer año de operación del edificio.

Puede que la aportación de mayor importancia de este capítulo consista en la importancia dada dentro de la nueva metodología propuesta al análisis de la información sobre el comportamiento real en servicio del edificio. Este análisis nos permitirá identificar fallos puntuales de las medidas pasivas, de los sistemas de HVAC, mejoras factibles en el perfil de regulación, etc., así como anticipar la necesidad de rehabilitación energética del edificio.

En el caso experimental *Casa Zaranda*, expuesto al final de este quinto capítulo, aplicamos las aportaciones científicas realizadas en el capítulo tres, en relación a la introducción de dispositivos VLEGE en MEB en clima subtropical. Igualmente, también se aplican las aportaciones científicas realizadas en los capítulos cuatro y seis, en relación a la instrumentación de MEB y el análisis del factor *U-Value* para la caracterización de la capacidad de aislamiento de la envolvente térmica en los mismos.

Este quinto capítulo de esta tesis doctoral se estructura de la forma que sigue. En el primer apartado realizamos una revisión del estado del arte del conocimiento científico en relación a las estrategias existentes para el diseño de edificios MEB. En el segundo apartado analizamos la importancia de la negociación inicial establecida entre cliente y equipo de diseño para el objetivo de MEB en clima subtropical. En el tercer y cuarto apartados se analiza la contribución del diseño arquitectónico pasivo y de la ingeniería de instalaciones en el diseño de MEB. En el quinto apartado analizamos la fase constructiva del edificio, y en el sexto la de operación y mantenimiento. Finalmente, el apartado séptimo de este quinto capítulo está dedicado a la validación, mediante la aplicación paso por paso en un caso práctico real de vivienda unifamiliar de nueva construcción en clima subtropical, de toda la metodología expuesta.

5.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior destacamos cómo el marco regulador actual de la eficiencia energética en edificios, incorpora aspectos sobre cuáles son los requisitos que el edificio debe cumplir para alcanzar el nivel de MEB únicamente en el caso de las certificaciones voluntarias; mientras que la normativa de obligado cumplimiento en España todavía no hace referencias concretas a esos requisitos MEB.

Autores como [168-171] nos ilustran sobre las mejores estrategias para la consecución del MEB en rehabilitación y obra nueva, pero apenas incluyen estrategias sobre la objetivación del proceso de toma de decisiones.

En el caso de [172], se incorpora un análisis del proceso de decisión, encaminado a maximizar el beneficio económico de la rehabilitación,

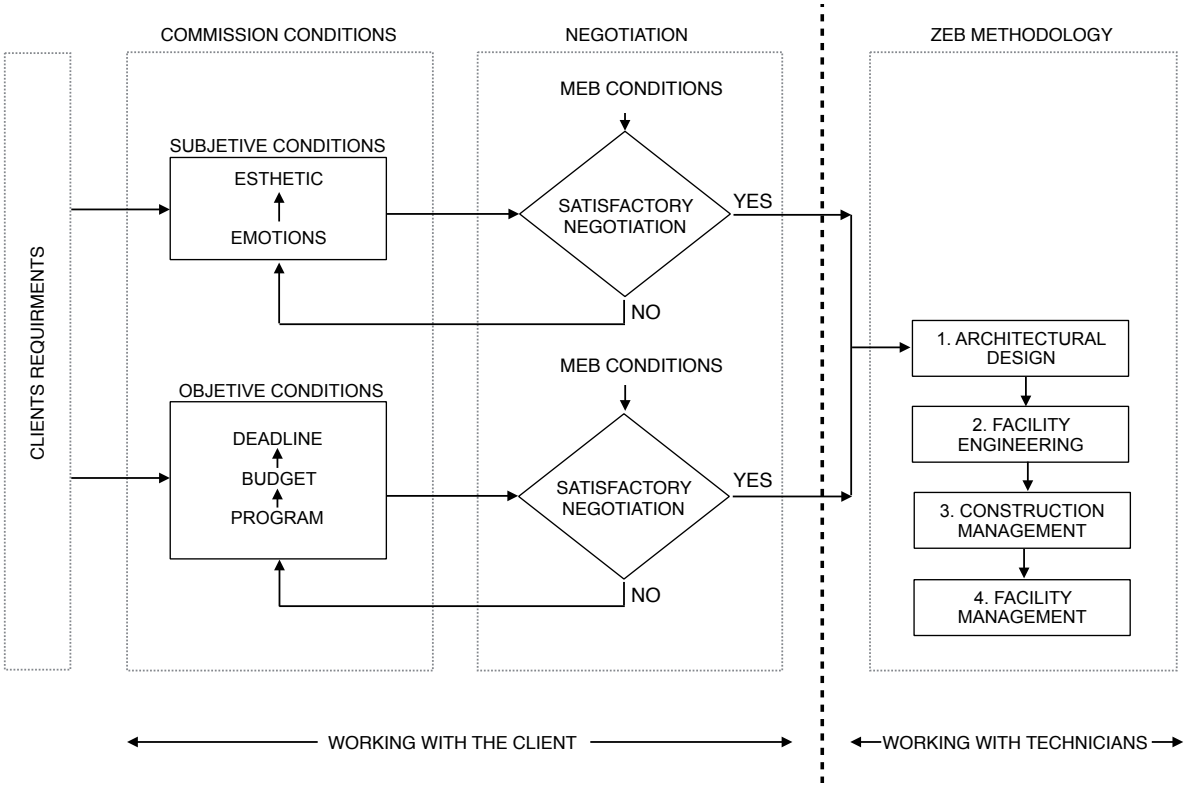


Figura 5.1. Algoritmo resumen del proceso completo de diseño, desarrollo, construcción y gestión de un edificio MEB en clima subtropical

minimizar el presupuesto y decidir la estrategia óptima de rehabilitación energética, pero no a cómo organizar el proceso paso a paso para conseguirlo, desde la perspectiva del técnico responsable del proyectarlo.

Queda por tanto pendiente validar un método científico que permita de forma sistemática afrontar el desafío de la realización de edificios MEB en clima subtropical y que abarque la fase de negociación, la de diseño, la de construcción y la de operación y mantenimiento.

El reto a priori no es fácil, ya que el comportamiento que debe tener un edificio en este clima es cambiante con la época del año [173]; con lo cual hemos de imaginar, diseñar, e implementar elementos que permitan modificar las prestaciones de la envolvente en función de las necesidades en cada momento. No hay una solución única y definitiva, sino que ésta se debe ir adaptando a la variabilidad del régimen climático a lo largo del año. La mayor parte del tiempo sobrará calor dentro y habrá que extraerlo; pero en ciertos meses, aunque muy pocos, las necesidades serán contrarias y deberemos conservar y potenciar el calor interior generado.

Desde nuestra experiencia, un error muy común entre los promotores consiste en pretender que un edificio puede llegar a ser MEB confiando sólo en la mejora de la eficiencia energética de sus instalaciones, sin caer en la cuenta de la trascendencia del diseño arquitectónico, las soluciones constructivas y la fase de operación del edificio. Esta estrategia de concentrar toda la responsabilidad de la eficiencia energética en los sistemas activos del edificio, viene heredada de la cultura del movimiento moderno y postmoderno en arquitectura [174, 175]. Casi siempre, este planteamiento irreflexivo, además de que puede llevar a un gasto superfluo, traerá consigo una incapacidad manifiesta para alcanzar el deseado objetivo MEB.

Por otro lado, está la concepción de que priorizar la consecución del objetivo MEB en el

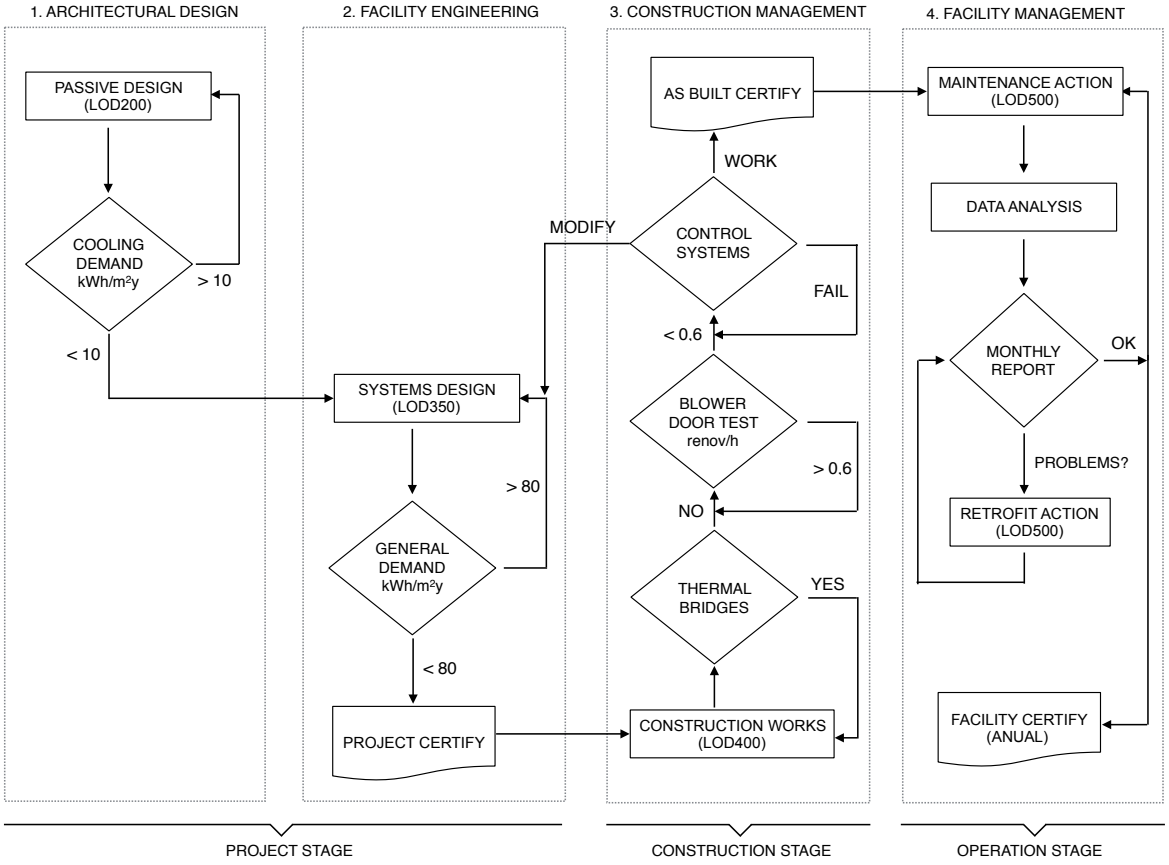


Figura 5.2. Algoritmo resumen de la metodología MEB propuesta

edificio implica condicionar un buen diseño y la innovación en arquitectura [176].

Ninguna de las dos consideraciones anteriores son ciertas, y sin embargo ambas deben armonizarse para conseguir un edificio eficiente que ejemplifique un avance significativo para el progreso de la mejor arquitectura de nuestro tiempo. Ese es precisamente uno de los objetivos de la metodología desarrollada en este trabajo de investigación: conseguir altísimas cotas de eficiencia energética sin clichés que empobrezcan la innovación en el diseño arquitectónico del proyectista.

El proyecto y ejecución de un edificio con pretensiones MEB en clima subtropical exige el compromiso entre la mejor ingeniería y la mejor arquitectura, con una concepción global y holística de un problema que es multivariable [177], para integrar con la debida sinergia todos los elementos (envolvente térmica, instalaciones, sistemas de instrumentación, niveles de ocupación, etc.), en la búsqueda del objetivo de consumo de energía cero. Por supuesto, ello exige *smart* en todo el proceso, basado en continuas tomas de decisiones en función a variables de sistema (temperatura, humedad, ocupación, etc.) ligadas al potencial del emergente internet de las cosas (IoT).

Una vez finalizada la obra, ésta requiere un seguimiento continuo durante todo su periodo de vida útil [178-180]. Este seguimiento dependerá en gran medida del uso al que se destina el edificio (no será igual en un aeropuerto o en un hospital que en una vivienda unifamiliar). Es imprescindible tener información sobre cómo funciona y cómo evoluciona en el tiempo el edificio construido para acometer las acciones de mantenimiento necesarias, así como, en su caso, adoptar las medidas correctoras que procedan en la etapa de servicio del edificio, y los nuevos requerimientos

que se le soliciten. Esto, con carácter general, podrá exigir durante el periodo de vida útil del MEB, sucesivas rehabilitaciones energéticas, de mayor o menor calado en función de los nuevos requerimientos.

Es importante señalar que la fase inicial de implementación de la metodología MEB propuesta, pasa por una negociación inicial con el promotor del edificio (ver figura 5.1). Es en esta etapa de trabajo previo con el cliente donde se acuerdan los requisitos a alcanzar por el edificio, todos evaluables pero algunos objetivos (programa, presupuesto y plazo) y otros subjetivos (estética y sensaciones). No es posible iniciar la siguiente etapa de trabajo con los técnicos hasta que los condicionantes requeridos por el cliente y los condicionantes MEB han sido integrados en el planteamiento del problema y resueltos satisfactoriamente.

La figura 5.1 representa, de una manera esquemática resumida, el algoritmo que describe el proceso completo de la edificación y gestión de un edificio MEB en clima subtropical, desde los requerimientos previos por parte del cliente, que naturalmente deberán ser modulados por los criterios MEB, hasta la gestión del edificio durante todo su periodo de servicio.

La figura 5.2 desarrolla en detalle el bloque *MEB methodology* esbozado en la figura 5.1. Esta metodología propuesta para el proyecto, la construcción y la operación del MEB establece cuatro etapas secuenciales, claramente diferenciadas por la naturaleza de las tareas a desempeñar, el perfil profesional del personal responsable y el nivel de desarrollo del edificio. Estas cuatro etapas son: *architectural design*, *facility engineering*, *construction management* y *facility management*, las cuales serán descritas a continuación.

1. ARCHITECTURAL DESIGN	2. FACILITY ENGINEERING	3. CONSTRUCTION MANAGEMENT	4. FACILITY MANAGEMENT	REQUIREMENTS
1. SUNSHADING				No solar gains in hot period
2. THERMAL ENVELOPE				Ue < 0,15 Wm^2/K, continuous
3. FORM FACTOR				F < 0,8 m^2/m^3
4. AIRTIGHT ENVELOPE				No weak points
5. NATURAL VENTILATION				So > 0,05 m^2_o/m^2_f
6. NATURAL LIGHTING				Sg > 0,1 m^2_g/m^2_f
	7. HEAT RECOVERY VENTILATION			OPTIONAL (12)
	8. COOLING SYSTEM			P < 10 W/m^2
	9. HOT WATER GENERATION			Thermosolar 90% demand
	10. EFFICIENT HOUSEHOLDS			A++
	11. EFFICIENT LIGHTING			A++
	12. LOW ENTHALPY GEOTHERMAL			OPTIONAL (7)
	13. RENEWABLE ENERGY			OPTIONAL (8, 9, 10, 11)
	14. DATA ACQUISITION			kWh, T^a, H, ppm CO_2
		15. ENVELOPE THERMOGRAPHY		No thermal bridges
		16. BLOWER DOOR TEST		h^{-1} < 0,6 renov/h
		17. CONTROL SYSTEMS		As built certify
			18. DATA ANALYSIS	Monthly report
			19. MAINTENANCE ACTION	Facility certify
			20. RETROFIT ACTION	Facility certify

Figura 5.3. Resumen de etapas y requisitos de la metodología propuesta

5.2 NEGOCIACIÓN INICIAL

Tal y como adelantábamos en la introducción a este capítulo, con carácter previo pero formando parte de la metodología MEB, es necesaria una fase inicial de negociación con el promotor del edificio. Es en esta etapa de trabajo previo con el cliente donde se acuerdan los requisitos a alcanzar por el edificio, todos evaluables pero algunos objetivos (programa, presupuesto y plazo) y otros no (estética y emociones). No es posible iniciar la siguiente etapa de trabajo con los técnicos hasta que los condicionantes requeridos por el cliente y los condicionantes MEB han sido integrados en el planteamiento específico del problema de diseño.

Integrar los condicionantes MEB con los condiciones requeridos por el cliente implica a menudo un importante nivel de creatividad e imaginación, combinados con una buena dosis de realismo. La creatividad y la imaginación permiten resolver los distintos requerimientos de manera diferente, no siempre convencional, para alcanzar el nivel óptimo de eficiencia y rendimiento. Un posicionamiento realista del problema nos permite a la vez corregir las expectativas del cliente, especialmente aquellas que tienen que ver con las limitaciones de presupuesto.

5.2.1 Condicionantes objetivos

Hablamos de condicionantes objetivos cuando es posible establecer un parámetro concreto que permita evaluar, positiva o negativamente, su cumplimiento. Factores como el programa, el presupuesto y el plazo pertenecen a este grupo de condicionantes objetivos.

5.2.1.1 Programa

El parámetro concreto que permite evaluar el cumplimiento de este condicionante es lo que llamamos superficie construida (SC). La SC de un edificio se mide en planta, y es la suma de la superficie útil (SU) más la superficie ocupada por los elementos constructivos del edificio (cerramientos, tabiques, muros, pilares, etc.). La SU de un edificio es la suma de todas las superficies pisables de cada estancia que forma parte del edificio, con una altura libre mínima de 1,50 metros.

El programa es un concepto complejo que condiciona de diferentes formas la negociación inicial del MEB. Si bien su parámetro concreto es la SC, abarca igualmente otros aspectos fundamentales como su uso específico del edificio y el número y distribución de las estancias.

El uso del edificio se refiere a la funcionalidad principal para el que será proyectado. No es lo mismo un edificio residencial, que un edificio terciario, industrial, comercial, educativo, administrativo, de infraestructura de transporte, hospitalario, de pública concurrencia, etc. Cuando el edificio es de uso mixto, será necesario establecer en cada zona del mismo su uso principal.

Dentro de un mismo uso es conveniente en ocasiones distinguir por tipologías. Por ejemplo, en el caso del uso residencial distinguimos: vivienda aislada, vivienda pareada, vivienda en hilera, vivienda en bloque aislado, vivienda entre medianeras, etc. Todavía más, dentro de ciertas tipologías funcionales como por ejemplo el bloque aislado, es adecuado distinguir el bloque en H del doble crujía o del bloque en estrella.

En todos los casos anteriores, distinguir por tipos y subtipos funcionales ayuda a converger con el cliente en la negociación inicial del MEB.

5.2.1.2 Presupuesto

El parámetro concreto que permite evaluar el cumplimiento de este condicionante es lo que llamamos presupuesto de promoción (PP), sin incluir gastos de venta ni de publicidad. El PP de un edificio es la suma del presupuesto de construcción (PC), más los honorarios técnicos (proyecto, dirección de obras, seguridad y salud, geotecnia, consultorías específicas, etc.), más los gastos administrativos (licencias, notaría, etc.). El PC de un edificio es la suma del presupuesto de ejecución material (PEM),

más los gastos generales de la constructora (laborales, seguros, financieros, alquileres, etc.) y su beneficio industrial. El PEM de un edificio es la suma del coste de todas las partidas de obra necesarias para construirlo, incluyendo suministro de materiales y mano de obra de colocación. Se suele expresar como la suma algebraica del producto de las diferentes partidas por su respectivo coste unitario, agrupadas en capítulos.

En un MEB no está justificado a priori un aumento del presupuesto por encima del 10% del total de actuación, con respecto al mismo edificio estrictamente normativo, por conseguir una reducción significativa del consumo de energía del mismo. Esto es así principalmente por dos motivos, que pasamos a desarrollar a continuación.

El primero es porque la complejidad inherente a la obtención de un mejor desempeño energético del edificio se resuelve en gran medida en la etapa de diseño. No queremos decir con esto que la etapa de construcción y la de vida útil no sean fundamentales, sino más bien que lo fundamental en estas últimas es que las cosas se hagan conforme al plan establecido en la etapa de diseño. Son precisamente los costes asociados a esta etapa de diseño los menores en comparación con la etapa de construcción y de vida útil del edificio (del orden de un 3-15% de los costes de construcción según escala, uso y tipología del edificio); y aunque resulten incrementados como respuesta a este aumento de complejidad, representan un porcentaje marginal del coste total a afrontar por el promotor (no más del 1% del PEM).

El segundo es que lo fundamental en la etapa de construcción y de operación es garantizar que las tareas se ejecuten realmente con la calidad planificada, conforme al plan establecido en la etapa de diseño. Eso no debería encarecer la construcción de manera significativa, más allá de un aumento notable en la partida de los materiales de aislamiento a emplear. La repercusión total de la partida de suministro y colocación de materiales de aislamiento en la envolvente opaca del edificio no supera de media el 0,1% del coste de toda la obra, por lo que un incremento notable no implicaría en ningún caso un sobrecoste significativo del presupuesto.

Otras partidas con incidencia en la mejora de la eficiencia energética del edificio, como son los tipos de vidrios y carpinterías, pueden compensarse adecuadamente desde el diseño, a la espera de que la escala de mercado convierta en perfectamente competitivas soluciones que hasta hace relativamente poco parecían exclusivas del segmento de mercado de alta gama. Nos estamos refiriendo a soluciones de vidrio de doble y triple cámara, inyectados de gases nobles, con láminas bajo emisivas y separadores de poliamida de baja transmitancia.

Por otro lado, debe ser tenido en cuenta, desde el punto de vista de su incidencia en la reducción del presupuesto, el hecho de que edificios bien proyectados, con un adecuado diseño de huecos y una envolvente térmica de altas prestaciones, reducen apreciablemente su dependencia de los sistemas activos HVAC tradicionales. Esto puede suponer una ventaja competitiva que en cierta medida compense el sobrecoste de otras partidas, ya que la carga de instalaciones se reduce en el edificio MEB y, consecuentemente su presupuesto asociado.

5.2.1.3 Plazo

El parámetro concreto que permite evaluar el cumplimiento de este condicionante es lo que llamamos licencia de primera ocupación (LPO). La LPO es un documento administrativo que establece la fecha a partir de la cual el edificio es utilizable para el fin para el que ha sido proyectado. Es la culminación de un proceso temporal que se inició con la contratación del equipo técnico responsable del proyecto, y continuó con la contratación de una empresa constructora responsable de la obra de edificación.

La cuestión del plazo es habitualmente un aspecto fundamental, a veces incluso el principal, para muchos promotores. Es verdad que la fase de diseño y concepción del MEB se complejiza ante la cantidad de nuevos imputs que deben ser tenidos en cuenta en la resolución del problema multivariable que supone la culminación del proyecto de ejecución

de un edificio. No es menos cierto sin embargo que para responder adecuadamente a ese aumento de complejidad de todo el proceso, existen nuevas herramientas y metodologías de las que el estándar BIM y la propia metodología expuesta en este capítulo son buena prueba.

Mayor complejidad de tarea puede compensarse con más cantidad de personal en el mismo plazo de tiempo, si existe una metodología que integre y coordine adecuadamente todo el proceso de diseño del MEB. Es inevitable sin embargo que, tal y como apuntamos en el apartado anterior, esto incremente el presupuesto dedicado a diseño, pero en un porcentaje poco significativo en comparación con el que maneja el promotor para el edificio completo.

Tal y como ya hemos visto, en fase de diseño del MEB y a pesar del aumento de complejidad del problema inicial, no tienen porqué aumentar los plazos de entrega del proyecto de ejecución, si contamos con las herramientas y las metodologías adecuadas.

En lo que respecta a la fase de construcción del MEB, podemos decir otro tanto de lo mismo. Esto es así, fundamentalmente porque los nuevos procedimientos a incorporar en la construcción del MEB son mínimos (estudios termográficos y ensayos de estanqueidad de la envolvente). La mayoría de las repercusiones del método en la etapa de construcción implican una mejora de la calidad en la ejecución material de las partidas de obra. Se trata en definitiva de no construir más, sino de construir mejor.

5.2.2 Condicionantes subjetivos

Hablamos de condicionantes subjetivos cuando no es posible establecer un parámetro concreto que permita evaluar su cumplimiento. Puede parecer frívolo incorporar el análisis de elementos subjetivos en un trabajo científico como éste. Factores como las emociones y la estética son de este tipo, y sin embargo resultan aspectos fundamentales que determinan las condiciones finales del encargo, por lo que, a nuestro juicio, resulta muy adecuado considerarlos.

5.2.2.1 Emociones

El aspecto emocional es un aspecto clave en la toma de decisiones del ser humano. A menudo son las emociones las que convierten las decisiones personales en verdaderamente humanas y atractivas. Esto es así, de manera especial, con los objetos creativos: desde el mobiliario más sencillo, hasta el más grandioso de los edificios.

La manera en que la luz natural ilumina los espacios; los materiales, colores y texturas en la arquitectura; la escala de los recintos; los juegos en los volúmenes y en las formas; la interpretación del programa funcional; el diálogo con el espacio natural y con el paisaje; el juego de las proporciones; etc., representan un mundo de posibilidades que también debe conciliarse con el objetivo MEB del edificio.

5.2.2.2 Estética

Los aspectos estéticos en la toma de decisiones están directamente relacionados con los aspectos emocionales del individuo. En realidad podrían entenderse como un caso particular de estos últimos, basado fundamentalmente en el diseño y la composición de formas arquitectónicas.

En el caso concreto de las viviendas unifamiliares, la promoción de su casa va a ser, con mucha probabilidad, el proyecto más ambicioso en que una familia media pueda verse inmersa a lo largo de su vida. Identificarse estéticamente con su casa, igual que hacerlo con su coche o con la ropa que llevan puesta es una razón que no por subjetiva deja de ser de lo más lógica y poderosa. A menudo lo puramente estético constituye un condicionante más poderoso de lo que a clientes y arquitectos nos gustaría reconocer.

5.3 DISEÑO ARQUITECTÓNICO

La etapa 1 de la figura 5.2 -*architectural design*- se corresponde con el diseño pasivo del edificio, y su perfil profesional responsable es el arquitecto proyectista. El nivel de desarrollo del BIM (LOD) requerido en esta etapa es LOD200, lo que significa que se representa gráficamente dentro del BIM como un sistema, objeto o conjunto genérico con cantidades aproximadas, tamaño, forma, ubicación y orientación.

El indicador que nos permite superar con éxito los requisitos metodológicos fijados para esta etapa es el nivel de demanda de energía para refrigeración del edificio, siendo su valor máximo los 10 kWh/m^{2}a. Este criterio es fruto de la experiencia investigadora y profesional de los autores, y es más restrictivo que el aceptado por la certificación passivhaus clásica [181]. La razón es que no se diseña el MEB para cumplir los requisitos del nZEB, sino para los ZEB y los +ZEB, mucho más ambiciosos.

Los factores que han de ser optimizados para reducir al máximo la demanda de energía para refrigeración del edificio son (ver figura 5.3): protección solar del edificio, envolvente continua de transmitancia térmica mínima, mínimo factor de forma, envolvente estanca, máxima ventilación natural y máxima iluminación natural.

5.4 INGENIERÍA DE INSTALACIONES

La etapa 2 de la figura 5.2 -*facility engineering*- se corresponde con el diseño de los sistemas activos del edificio, y su perfil profesional responsable es el ingeniero de detalle. El LOD requerido en esta etapa es LOD300, lo que significa que está representado gráficamente dentro del BIM como un sistema, objeto o conjunto específico en términos de cantidad, tamaño, forma, ubicación y orientación.

El indicador que nos permite superar con éxito los requisitos metodológicos fijados para esta etapa es el nivel de demanda de energía primaria del edificio, incluyendo sistemas y aparatos electrodomésticos, y su valor máximo los 80 kWh/m^{2}a. Una vez superadas las etapas 1 y 2 de la figura 5.2, correspondientes al *project stage*, el proyecto del edificio obtiene el *Project certify*, que garantiza el nivel de eficiencia energética del edificio en la etapa de proyecto.

Con carácter general, dependiendo del caso particular tratado, los sistemas que han de ser optimizados para reducir al máximo la demanda de energía general del edificio son (ver figura 5.3): ventilación, instalación de aire acondicionado, instalación de generación de ACS, electrodomésticos, iluminación artificial, geotermia de muy baja entalpía, instalación de generación de energía renovable y sistema de instrumentación y adquisición de datos.

5.5 GESTIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

La etapa 3 de la figura 5.2 -*construction management*- se corresponde con la ejecución material del edificio, y su perfil profesional responsable es el *project manager*. El LOD requerido en esta etapa es LOD400, lo que significa que está representado gráficamente dentro del BIM como un sistema, objeto o conjunto específico en términos de tamaño, forma, ubicación, cantidad y orientación con detalles, fabricación, montaje e información de instalación.

El indicador que nos permite superar con éxito los requisitos metodológicos fijados para esta etapa es triple (ver figura 5.3). En primer lugar, el estudio termográfico de la envolvente térmica ejecutada debe justificar la inexistencia de puentes térmicos. En segundo lugar, el ensayo de blower door test realizado sobre edificio

terminado debe arrojar un valor máximo de 0,6 renov/h a 50 Pa. Realmente, aunque en la figura 5.2 estas dos etapas están representadas de forma secuencial, podrían ser llevadas a cabo de forma paralela. No obstante, nuestra experiencia aconseja realizarlas de forma secuencial, simplemente por criterios de racionalización del trabajo.

Finalmente, el *project manager* coordinador de esta etapa, debe certificar que todas las instalaciones y sistemas instalados en el edificio se han ejecutado conforme al *project certify* obtenido, alcanzando los estándares de eficiencia fijado en el *project stage*. Si durante el *construction stage* se hubiesen producido cambios significativos en el proyecto inicial, hay que volver a la etapa anterior para renovar el *project certify* y hacerlo coherente con lo finalmente construido. Una vez superada la etapa 3, el edificio terminado obtiene el *As built certify*, que garantiza el nivel de eficiencia energética del edificio construido.

5.6 MANTENIMIENTO DEL EDIFICIO

La etapa 4 de la figura 5.2 -*facility management*- se corresponde con el estado de servicio del edificio, y su perfil profesional responsable es el *facility manager*. El LOD requerido en esta etapa es LOD500, lo que significa que es un campo verificado de representación en términos de tamaño, forma, ubicación, cantidad y orientación.

El indicador que nos permite superar con éxito los requisitos metodológicos fijados para esta etapa es el *monthly report*, que a partir del análisis de los datos obtenidos por el sistema de instrumentación (consumos, temperaturas, humedad, calidad del aire interior, etc.), controla la fase de servicio del edificio y si se están cumpliendo, con los niveles de tolerancia fijados, los objetivos marcados en el *As built certify*.

En caso afirmativo, el edificio en servicio obtiene el *Facility certify*, certificado que debe ser revisado anualmente. En caso negativo, el edificio deberá ser sometido a una actuación de rehabilitación energética que le permita en el plazo fijado (prescrito en el algoritmo de metodología ZEB del edificio en cuestión), cumplir (o mejorar) los objetivos marcados en el *As built certify*.

Para terminar esta sección, la figura 5.3 resume todos los apartados y requisitos de la metodología propuesta, los cuales han sido desarrollados a partir de la figura 5.2. Los requerimientos de la última columna son fruto de valores fijados en base a nuestra experiencia profesional e investigadora. Podrían haber sido seleccionados otros valores, pero a nuestro criterio estos son idóneos para alcanzar los criterios perseguidos.

5.7 EXPERIMENTACIÓN

El método de diseño y construcción de viviendas ZEB en clima subtropical desarrollado en este trabajo ha sido aplicado al proyecto de arquitectura, ingeniería, construcción y mantenimiento de una vivienda unifamiliar aislada denominada Casa Zaranda.

Casa Zaranda se ubica en zona climática *Csa* (*warm temperate/summer dry/hot summer*), según *Köppen-Geiger climate classification* [44]. Casa Zaranda se ubica en un barrio residencial en el área metropolitana de la ciudad de Huelva, en el extremo suroeste de España.

Los requerimientos objetivos recibidos de los clientes en Casa Zaranda, en relación con el programa a desarrollar, implicaban un uso residencial en dos plantas más sótano destinado a garaje y almacén. La superficie construida total sobre rasante no debía superar los 399,95 m^2 construidos (inferior al límite de 0,5 m^2/m^2 de edificabilidad de parcela fijado en la normativa urbanística).

El programa en planta sótano requería un aparcamiento para dos vehículos, taller y espacio de almacenamiento. El programa para planta baja requería cocina con cuarto lavadero, salón y comedor independiente, habitación de invitados con baño integrado y un aseo exterior. El programa para planta alta requería un estudio y dos habitaciones completas con baño integrado, además de un vestidor en la de matrimonio. Completa el programa del edificio un patio interior cubierto que ordena las circulaciones interiores conectando entre sí todas las plantas.

Los requerimientos objetivos en relación al presupuesto de construcción de la vivienda limitaban el mismo a 1.000 €/m^2 construido. Huelga decir que toda reducción conseguida en el presupuesto final sería muy conveniente.

Los requerimientos objetivos en relación al plazo de ejecución de la obra se fijaron entre los diez y doce meses de ejecución, en función de la climatología y los plazos de gestión administrativa de la licencia de obra y de primera ocupación.

Los requerimientos subjetivos recibidos de los clientes, tanto estéticos como emocionales, fueron bastante abiertos. No se definió ningún criterio estético, más allá del aplacado cerámico de la fachada y en realidad no por estética, sino para reducir costes de mantenimiento por repintado.

Tras una negociación satisfactoria de las condiciones MEB a incorporar en el diseño, se asumieron como condiciones de contratación en Casa Zaranda todos los requerimientos iniciales del encargo. A partir de este punto del proceso, pasó a un segundo plano el trabajo con el cliente y comenzó el trabajo con todos los técnicos involucrados en las fases de diseño arquitectónico, ingeniería de instalaciones, gestión de la construcción y mantenimiento del edificio.

5.7.1 Materiales y métodos

El software BIM utilizado para el diseño arquitectónico, los estudios de soleamiento y las simulaciones energéticas de la vivienda estudiada es la aplicación *Archicad*™, de la empresa *Grafisoft*™. El nivel de definición de los elementos utilizados (LOD) ha sido en general de LOD300, suficiente para la caracterización energética del modelo. El *Project Building Information Protocol* utilizado está basado en el modelo de la *American Institute of Architects* (AIA™).

Los estudios termográficos para comprobar la correcta ejecución del aislamiento durante la obra y la continuidad de la envolvente térmica de la vivienda terminada se han realizado con una cámara *TESTO*™ 875-1i con matriz de 120 x 160 sensores y una resolución térmica (NETD) < 50 mK. Rango de temperatura: -20 ˚C a +350 ˚C, y posterior *software TESTO*™ de procesado.



Figure 5.4. Cámara termográfica, equipo multifunción y equipo blower door utilizados

La herramienta de medición de la transmitancia térmica del cerramiento utilizada es el instrumento multifunción *TESTO*™ 435-2, con 2 canales para medir temperatura (sensores NTC y termopar K), humedad relativa, velocidad y caudal de aire, presión absoluta, intensidad de luz, turbulencias y CO_2. El *software* de procesado es también de *TESTO*™.

Para la comprobación del nivel de estanqueidad de la envolvente se ha seguido el procedimiento estándar de BDT según EN 13829 [38-40] con el equipo *Minneapolis Blower Door Model 4* (230V). Se han realizado un total de tres BDT. Dos durante la ejecución de la obra, y uno con la vivienda completamente terminada. Los tres equipos citados aparecen en la figura 5.4.

El sistema de instrumentación para la obtención de datos de la vivienda se ha desarrollado

específicamente para esta investigación. Vamos a explicarlo de forma breve a continuación, con objeto de hacer el trabajo auto contenido.

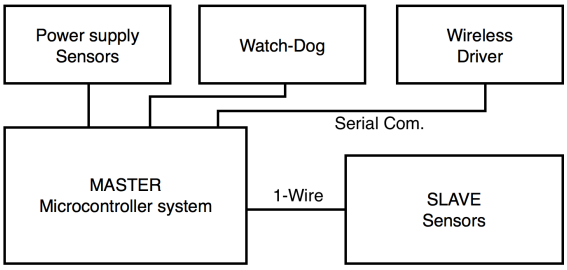


Figure 5.5. Diagrama de bloques de la instrumentación de la vivienda

La figura 5.5 representa el diagrama de bloques de cada *mesurement device* (MD) de temperatura y humedad en el interior de la vivienda. Consta de un bloque denominado *slave* que contiene los sensores, y otro denominado *master* que gestiona la petición de datos al *slave*, el procesamiento de los mismos, su almacenamiento, así como las comunicaciones del *mesurement device*.

El *master*, mediante el *wireless driver* transmite vía inalámbrica los datos de temperatura y humedad hasta un nodo central en la vivienda, desde donde se genera la salida a internet de todos los datos. En este caso, la vivienda dispone de conexión a internet vía cable. Si no fuera así, el sistema está preparado para transmitir fuera de la vivienda vía telefonía móvil o incluso modem radio.

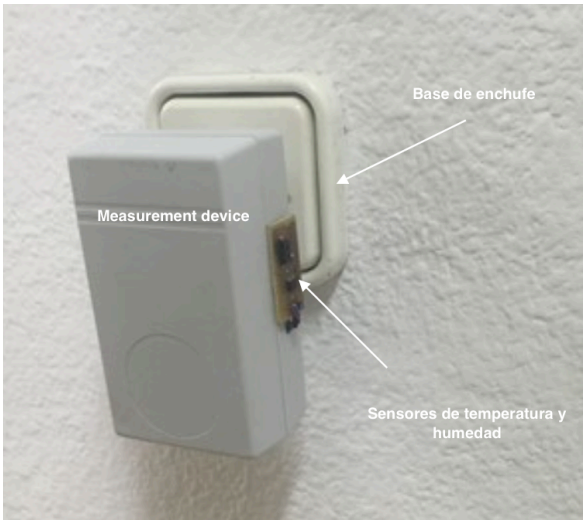


Figure 5.6. Measurement device instalado en la vivienda en una base de enchufe

Se han instalado MD en todas las estancias de la vivienda sometida a estudio. De esta forma disponemos de medidas de temperatura y humedad en toda la vivienda. El funcionamiento inalámbrico de los MD permite sensorizar la vivienda sin necesidad de emplear cableado interior, con lo cual, la instalación es inmediata sin requerir intervención de obra alguna, y también la retirada del sistema no deja huella.

Los MD (figura 5.6) tienen un tamaño reducido, similar al de una base de enchufe, y además están autoalimentados. Si observamos la figura 5.6, se aprecia cómo va conectado directamente a una base de enchufe que le sirve de alimentación.

La figura 5.7 muestra el interior de un MD como el de la figura 5.6. Las partes de las que consta el dispositivo son:

Power supply. A partir de la tensión alterna del enchufe, la fuente genera las tensiones de alimentación de todos los elementos del dispositivo.

Slave. Módulo contenedor de los sensores de temperatura (DS2438) y humedad (HIH-4007).

Master. Está integrado por un *microcontroller system*. Su función es la de adquirir los datos de los sensores del bloque *slave*, procesar la información, almacenarla y enviarla al nodo central de la vivienda, donde está situado el *head master* que gestiona todos los MD, y proporciona comunicación entrante y saliente desde y hacia la vivienda, vía internet.

Wireless driver. Para llevar a cabo las comunicaciones inalámbricas del MD con el *head master* se utiliza un módulo *Xbee shield*, con el correspondiente módulo *Xbee S* [41]. Cada MD tiene una firma propia, de modo que, cuando se comunica hacia o desde el *head master*, su identificación es exclusiva.

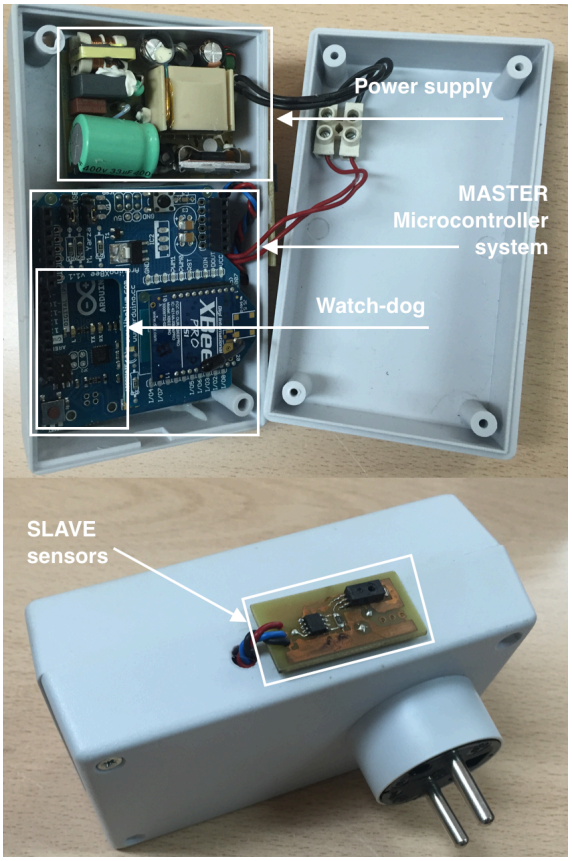


Figure 5.7. Detalle de interior de un measurement device

Whatch-dog. La misión de este bloque es la vigilancia de que el *master* esté funcionando de forma adecuada. En el momento en que, como consecuencia de la saturación de información, errores de comunicación o cualquier otro fallo; se detecten problemas en el *master*, éste genera una señal de *reset* que desconecta y reincida el microcontrolador.

La integración final de todo el sistema de instrumentación se realiza mediante la herramienta *software LabVIEW™ 7.0*, de *National Instruments*. El instrumento virtual final aquí presentado ha sido desarrollado por el grupo de investigación para el análisis de los datos obtenidos.

5.7.2 Resultados

A continuación exponemos los resultados obtenidos aplicando la metodología propuesta a la vivienda Casa Zaranda.

5.7.2.1 Negociación inicial

La negociación inicial mantenida con los promotores de la vivienda y futuros usuarios finales de la misma no incluyó, a petición de la propiedad, condiciones de eficiencia energética más exigentes de las marcadas por la normativa de obligado cumplimiento. Tampoco se mostraron en contra de incorporarlas, siempre que no implicara sobrepasar el presupuesto de construcción acordado.

Los objetivos marcados por el equipo técnico responsable del proyecto y la construcción de la vivienda fueron muy cercanos a los marcados por la certificación voluntaria *Passivhaus* (ver apartado 2.3.1 de este documento).

5.7.2.2 Diseño arquitectónico

Casa Zaranda responde a un tipo de construcción masivo (no prefabricado), con estructura de hormigón armado y envolvente externa de fábrica de ladrillo. Este sistema y sus respectivas variantes representan la tecnología constructiva predominante en países de clima subtropical como España, Portugal, Italia y en general el sur de Europa.

Casa Zaranda tiene una superficie construida total de 645,61 m^2, distribuida en dos plantas sobre rasante (397,39 m^2) y una bajo rasante (248,22 m^2). Las plantas baja y primera contienen el programa residencial propiamente dicho, orientando las estancias de día hacia el jardín situado en el lado sur de la parcela, y reservando el norte para el acceso, los baños y los dormitorios no principales. La planta sótano bajo rasante se destina a garaje, instalaciones y almacén, quedando fuera de la envolvente térmica del edificio, y funciona como colchón térmico con el terreno. La figura 5.8 representa la planta principal y una sección longitudinal de la vivienda, incluyendo la parcela.

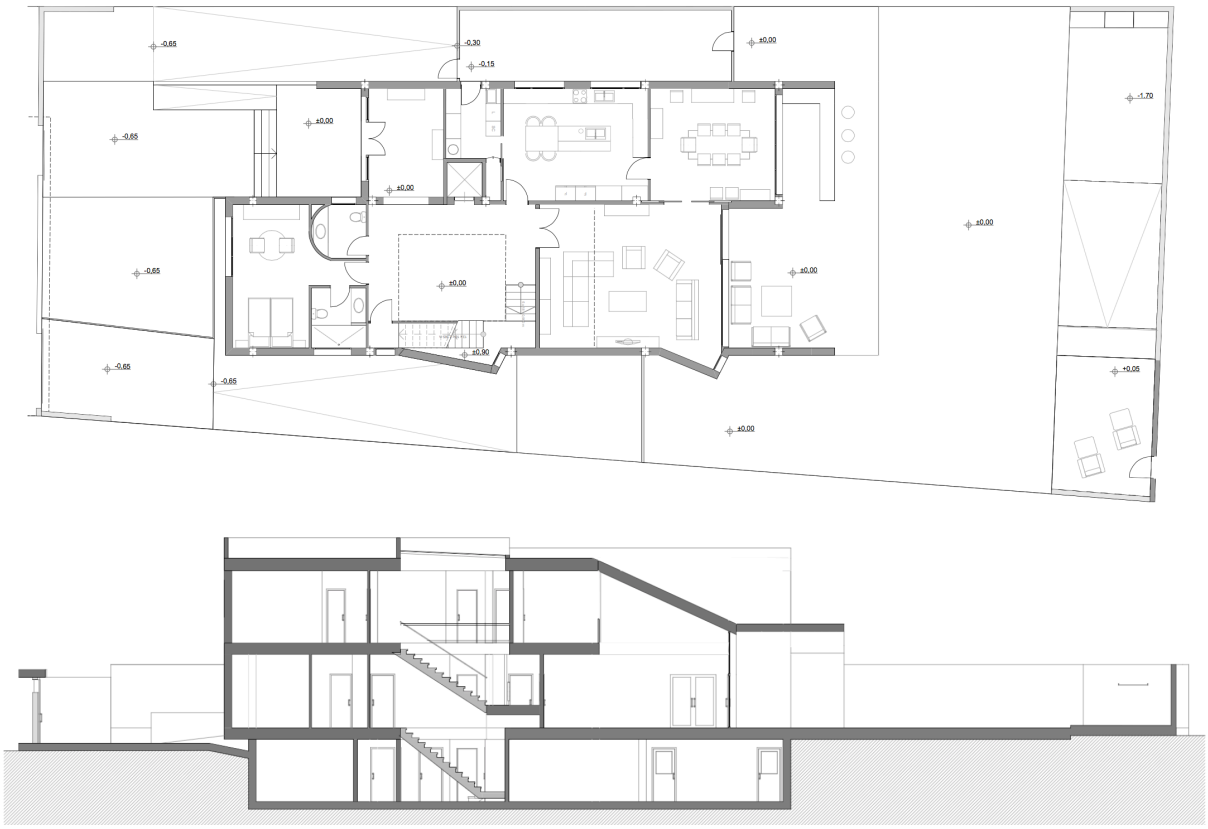


Figura 5.8. Planta baja y sección longitudinal de Casa Zaranda

Se estudiaron varias alternativas de ocupación de la parcela, optando por aquella que propiciaba un factor de forma (cociente entre la superficie de la envolvente exterior y el volumen interior encerrado) lo más reducido posible. La vivienda debía sacar el máximo partido a su ubicación privilegiada, abriendo grandes superficies acristaladas a la parcela en su lado sur, muy protegidas por grandes voladizos horizontales (figura 5.9). Los huecos de la fachada oeste se redujeron al mínimo para evitar el sobrecalentamiento producido por la radiación solar de tarde.

El valor final de demanda de energía de refrigeración obtenido en Casa Zaranda fue de 8 kWh/m²a, por debajo del valor máximo de 10 kWh/m²a exigidos en la aplicación de la



Figura 5.9. Alzados sur y norte de Casa Zaranda. Estado final

metodología. A continuación detallamos cada uno de los aspectos relacionados con el comportamiento energético de este edificio.

5.7.2.2.1 Protección solar del edificio

Por su ubicación geográfica en los 37º de latitud del hemisferio norte, casi todo el esfuerzo en Casa Zaranda se ha centrado en proteger las fachadas sur y oeste de la radiación solar directa en verano, aumentado el albedo de los materiales de la zona de la fachada expuesta y disminuyéndolo en las zonas únicamente accesibles para los rayos solares en invierno.



Figure 5.10. Estudio de asoleamiento. 21 diciembre a las 14:00h

Se estudiaron diversas opciones de profundidad para los voladizos en la fachada sur, la de más relevancia puesto que es la que conecta los espacios principales de la vivienda con el jardín. Finalmente se optó por una profundidad de 4,25 m para el voladizo sobre el salón, de 2,10 m para el voladizo sobre el comedor y de 2,10 m para el voladizo del dormitorio principal.



Figure 5.11. Estudio de asoleamiento. 21 junio a las 14:00h

En la figuras 5.10 y 5.11 podemos observar cómo el control de la dimensión de los voladizos de la fachada sur, por el diferente ángulo de incidencia de los rayos solares en verano e invierno, nos permiten introducirlos en la vivienda cuando éstos resultan beneficiosos y mantenerlos fuera de los huecos cuando no.

5.7.2.2.2 Envolvente continua de transmitancia térmica mínima

El valor medio de transmitancia (*U-Value*) medido en el cerramiento de Casa Zaranda en la zona estable es de 0,3 W/m²K (ver figura 5.12). Se trata de un valor mayor que el teórico aplicado en los cálculos de simulación, pero adecuado para mantener la demanda de refrigeración de la vivienda en el entorno de los 10 kWh/m²a.

Para conseguir ese valor de *U-Value* se instalaron 9 cm de lana mineral en la cámara del cerramiento. De las distintas alternativas de material de aislamiento existentes en el mercado, se optó por lana de vidrio de conductividad térmica 0,034 W/mK por sus cualidades añadidas de absorción acústica, su bajo precio de instalación, así como por sus facilidades de puesta en obra.

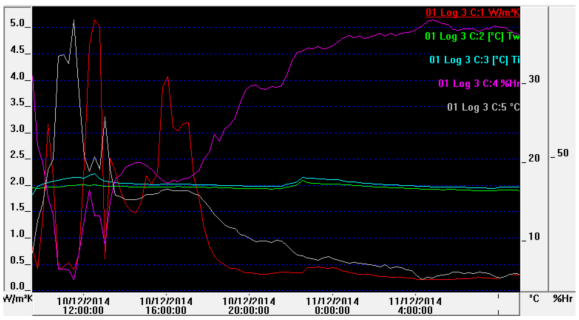


Figure 5.12. Medición del valor de *U-Value* en el cerramiento de Casa Zaranda

Para evitar los puentes térmicos en la envolvente, se aseguró la continuidad del aislamiento mediante la regla del lápiz, esto es, marcando con una línea continua la capa de aislamiento y su encuentro con los huecos del cerramiento en cada una de las secciones del edificio.

5.7.2.2.3 Mínimo factor de forma

Casa Zaranda presenta la máxima compacidad compatible con las regulaciones urbanísticas de la parcela. El volumen de aire neto interior es de 1.301,40 m^3 y el sumatorio de las superficies envolventes exteriores es de 693,21 m^2, lo que implica un factor de forma de 0,53 m^2/m^3, cumpliendo con el requisito exigido por la metodología de ser menor de 0,8.

5.7.2.2.4 Envolvente estanca

Para la obtención de la necesaria estanqueidad en la envolvente de Casa Zaranda se estudiaron varias alternativas, desechando la instalación de membrana semipermeable en beneficio de la aplicación de una capa continua de mortero de yeso-cemento en la cara interior del cerramiento. Los pasos de instalaciones se sellaron con el mismo mortero, aplicando silicona al interior de los tubos corrugados y pasacables. Las juntas de unión entre carpinterías y muro se rellenaron con espuma de poliuretano autoexpansiva flexible de alta durabilidad.

5.7.2.2.5 Máxima ventilación natural

Para favorecer la ventilación natural cruzada en Casa Zaranda se estudió la contribución que el patio interior cubierto aportaba por efecto chimenea, una vez abiertas cualquiera de las ventanas de las habitaciones y del salón. El esquema de funcionamiento queda resumido en la figura 5.13.

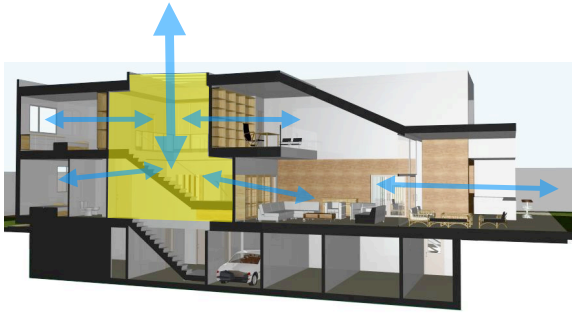


Figure 5.13. Esquema de ventilación cruzada en Casa Zaranda

Para conseguir el efecto deseado era imprescindible dotar al patio cubierto de ventanas laterales motorizadas, dispuestas a una cota superior a la de las ventanas de las habitaciones, de modo que el flujo de aire caliente encontrase su camino de salida natural a través del hueco del patio. El sistema instalado permite automatizar la apertura y el cierre de los huecos del lucernario en función de la necesidad de disipar el calor o conservar el frío interior acumulado.

A continuación mostramos dos situaciones diferentes en la aplicación práctica del sistema. En la primera, el sistema de apertura automática del lucernario se ha desconectado, manteniendo las condiciones de envolvente exterior estanca; mientras que se ha mantenido operativo en la otra, favoreciendo la ventilación cruzada en el interior de la vivienda. Las consecuencias de ambas estrategias puede observarse en las figuras 5.14 y 5.15.

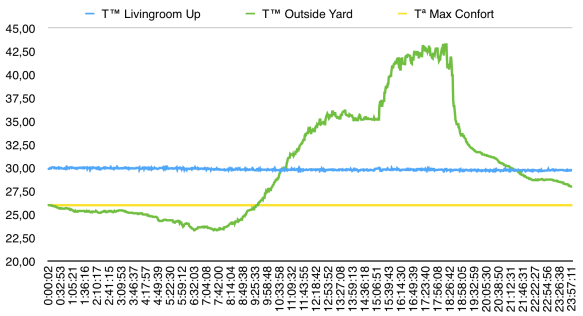


Figure 5.14. Variación de la temperatura interior sin apertura de ventanas

En la figura 5.14 observamos la variación de la temperatura del aire interior y exterior, así como el porcentaje de humedad relativa, a lo largo de un día de verano (18 de julio de 2015), en la vivienda objeto de estudio, con las ventanas y huecos completamente sellados. Hemos marcado la horizontal de 26 ºC, por debajo de la cual el intercambio de aire con el exterior resultaría adecuado a los efectos de disipar las cargas térmicas acumuladas en el interior durante el día. Esta condición de refrescamiento gratuito se cumple, para este día específico, en la franja temporal que se extiende desde las 0:00 a las 9:30 de la mañana, aproximadamente. Sin embargo la temperatura del aire interior de la vivienda se mantiene prácticamente constante en el entorno de los 30 ºC (sobrecalentamiento), como consecuencia de

su imposibilidad de disipar la carga térmica acumulada a lo largo del día.

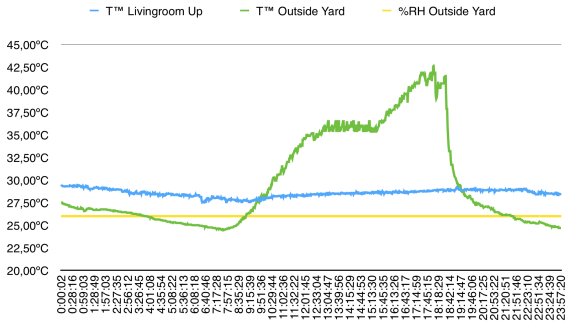


Figure 5.15. Variación de la temperatura interior con apertura de ventanas

En la figura 5.15, tomada para la misma vivienda el día 10 de julio de 2015, pero con las ventanas y el lucernario abiertos entre las 0:00 y las 7:00 de la madrugada, observamos el efecto beneficioso para el confort interior. Para una pauta de variación térmica exterior aún peor que la reflejada en la figura 5.14, la temperatura del aire interior de la vivienda se reduce notablemente gracias al refrescamiento nocturno gratuito por simple apertura de ventanas. La franja horaria de refrescamiento gratuito en este caso es diferente, y se extiende de madrugada desde las 4:00 hasta las 9:00 y por la noche a partir de las 22:00.

5.7.2.2.6 Máxima iluminación natural

Todas las estancias de la vivienda están iluminadas naturalmente para reducir el consumo eléctrico a las horas imprescindibles por falta de luz solar. También aquellas a las que la normativa de obligado cumplimiento relativa a salubridad y habitabilidad les permite no tener ventanas ni huecos exteriores como baños, vestíbulos y pasillos. Incluso el garaje en sótano aprovecha los huecos de luz que le permite el trazado de la rampa exterior de acceso.

El gran ventanal del salón y el comedor, así como el patio interior cubierto, una vez debidamente protegidos de la radiación solar directa por su efecto sobre el sobrecalentamiento, constituyen una gran fuente de luz natural que reduce al mínimo el consumo de iluminación de la vivienda. Tal profusión de huecos impone resolver el problema de la transmitancia térmica de los mismos. Se han instalando carpinterías de PVC de Uf = 1,2 W/m²K y vidrios de cámara de 12 mm con 95% de gas Ar y lámina bajo emisiva de Ug = 1,0 W/m²K.

En la figura 5.16 se representa el caso de Casa Zaranda. La media de ahorro anual como consecuencia de una buena iluminación natural es cercana a los 156,80 kWh/a. Mejores resultados se obtienen si comparamos con sistemas de iluminación artificial menos eficientes que los LED, a base de lámparas incandescentes, fluorescentes convencionales y fluorescentes compactas.

Estancia	Potencia media LED instalada (W)	Media anual de funcionamiento sin iluminación natural (h)	Media anual de funcionamiento con iluminación natural (h)	Ahorro consumo con iluminación natural kWh/a
Salón	72,00	1.095,00	438,00	**47,30**
Entrada	18,00	1.095,00	438,00	**11,83**
Cocina	36,00	547,50	109,50	**15,77**
Comedor	36,00	547,50	109,50	**15,77**
Vestidor	18,00	547,50	109,50	**7,88**
Biblioteca	18,00	547,50	109,50	**7,88**
Dormitorio 1	18,00	730,00	146,00	**10,51**
Dormitorio 2	18,00	730,00	146,00	**10,51**
Dormitorio 3	18,00	730,00	146,00	**10,51**
Baño 1	18,00	1.095,00	876,00	**3,94**
Baño 2	12,00	1.277,50	1.277,50	**0,00**
Baño 3	12,00	1.277,50	1.277,50	**0,00**
Baño 4	12,00	1.277,50	1.277,50	**0,00**
Lavadero	12,00	912,50	821,25	**1,10**
Patio	36,00	1.277,50	894,25	**13,80**
TOTAL	**354,00**	**13.687,50**	**8.176,00**	**156,80**

Figure 5.16. Ahorro por iluminación natural en Casa Zaranda

5.7.2.3 Ingeniería de instalaciones

El diseño de los sistemas de Casa Zaranda está orientado a la máxima reducción de la demanda general de energía de la vivienda. El valor final de demanda de energía general obtenido en Casa Zaranda fue de 76 kWh/m²a, por debajo del valor de 80 kWh/m²a exigidos en la aplicación de la metodología. A continuación detallamos cada unos de los aspectos relacionados con los sistemas activos de la vivienda.

5.7.2.3.1 Ventilación forzada de doble flujo con recuperación de calor

No se instaló ventilación forzada de doble flujo con recuperación de calor en Casa Zaranda. En su lugar se instaló sistema equivalente de geotermia de baja entalpía por disponer de terreno suficiente en la parcela, presentando un comportamiento térmico más adecuado en verano.

5.7.2.3.2 Instalación de aire acondicionado de máxima eficiencia

Para compensar los picos de temperatura en el interior de la vivienda, se optó por una instalación de consolas de aire acondicionado con sistema de volumen de refrigerante variable (VRV) de alta eficiencia. La condensación se produce por aire, y las unidades interiores son de tipo *split* de pared. Se trata de un sistema muy versátil y económico, susceptible de alimentarse a través de la instalación de paneles fotovoltaicos de la vivienda (Ver apartado 4.2.7).

5.7.2.3.3 Instalación de generación de ACS de máxima eficiencia

Por no encontrarse en el mercado, no se instalaron paneles híbridos FV-ACS. En su lugar, y dado que la superficie de cubiertas en la vivienda era suficiente, se optó por captadores solares térmicos planos convencionales, con una óptima relación calidad-precio. La instalación se sobre dimensionó con un total de ocho captadores, susceptibles de atender el 100% de la demanda de ACS de la vivienda.

Siendo obligatorio por normativa en España un sistema de apoyo para el ACS, se instaló por su reducido coste un pequeño termo de acumulación de 80 litros por efecto *Joule,* que nunca ha entrado en servicio. El problema del excedente de ACS en verano se solventó instalando un intercambiador de placa de titanio con un primario que cede todo el calor sobrante a la piscina, que actúa así como sumidero energético.

5.7.2.3.4 Electrodomésticos de máxima eficiencia

Todos los electrodomésticos instalados en Casa Zaranda estaban clasificados como letra A y superiores, con especial incidencia en el frigorífico; quedando éste instalado en la pared opuesta de la cocina dotada de placa de inducción, para evitar la transferencia de calor entre ambos electrodomésticos. La lavadora y el lavavajillas son del tipo de doble toma de agua fría y agua caliente, para mejor reducir consumos.

5.7.2.3.5 Iluminación artificial de máxima eficiencia

De las diferentes opciones de luminaria, se ha instalado iluminación LED en toda la vivienda, distinguiendo iluminación ornamental y operativa tanto en el interior como en el exterior, para reducir al máximo el consumo.

5.7.2.3.6 Geotermia de muy baja entalpía

Se instala en Casa Zaranda una conducción de aire enterrada tipo VLEGE, que sustituye a la admisión de aire exterior convencional (aireadores de ventana, aireadores pasamuros, etc.), de modo que el aire de renovación procedente del exterior de la vivienda se atempera previamente mediante el intercambio de calor con el terreno, cediéndolo en verano y tomándolo en invierno. La figura 5.17 representa el esquema de trazado del VLEGE en casa Zaranda.

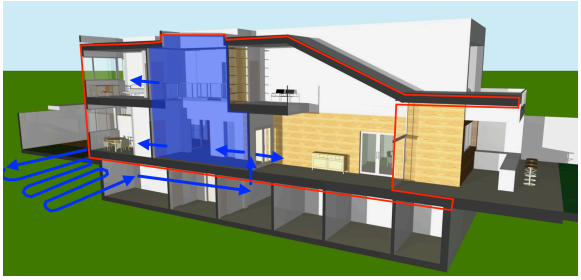


Figure 5.17. Esquema de VLEGE en Casa Zaranda

El aire de renovación se impulsa desde una caseta situada en el jardín exterior de la vivienda, se filtra y se hace pasar a través de un tubo de PVC-U de sección circular 150 mm de diámetro interior, enterrado a una profundidad entre 2’5 m y 3 m. Tiene una longitud en su tramo de tierra de 39 m en tramos rectos más 11 codos y dos semicodos. Como aporte para la

circulación forzada del aire, se coloca un ventilador heliocentrífugo de perfil bajo acoplado al tubo enterrado.

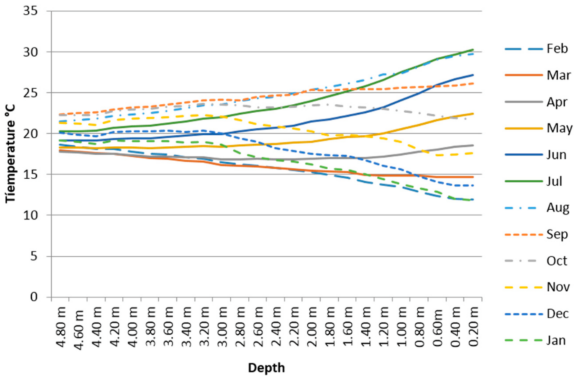


Figure 5.18. Variación de la temperatura media mensual del terreno con la profundidad

La figura 5.18 es el resultado de la instalación de una sonda de temperatura en el terreno en la parcela de Casa Zaranda [182]. Todo el desarrollo teórico de las conclusiones extraídas a partir de los datos de medición de temperatura del terreno adquiridos con dicha sonda se han incluido en el capítulo 3 de esta tesis. Como podemos observar, la temperatura del terreno es variable con la época del año, tendiendo a mantenerse constante a medida que aumentamos la profundidad de medición. La temperatura del terreno a dos metros de profundidad (vivienda sin sótano) oscila entre los 15 ºC y los 25 ºC según la época del año, mientras que a 4,80 metros de profundidad (vivienda con sótano) ésta oscila entre los 17 ºC y los 22 ºC.

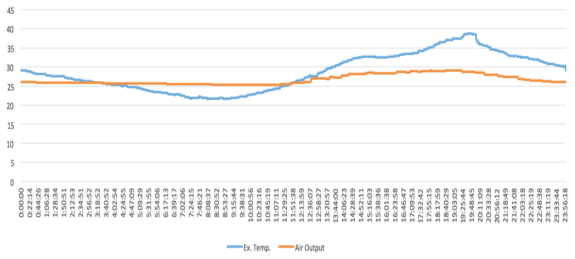


Figure 5.19. Variación diaria de la temperatura del aire exterior y a la salida del VLEGE

En la figura 5.19 observamos la variación de temperatura del aire exterior a la entrada y a la salida del tubo de aire enterrado, en un día cálido de verano (4 de agosto 2015). La temperatura del aire exterior (igual que la del aire a la entrada del tubo) oscila entre los 21 ºC y los 39 ºC, mientras que la temperatura del aire a la salida del tubo oscila entre los 25 ºC y los 29 ºC.

5.7.2.3.7 Instalación de generación de energía renovable

En la figura 5.20 observamos la curva de producción eléctrica de un sistema de cuatro paneles fotovoltaicos para un día cálido (10 julio 2015). La línea gris representa el valor de los 575 Wh, correspondiente al consumo declarado de una unidad tipo *split* sencilla de COP 3,3 y 1.500 frig/h de producción de frío (fabricante *LG*), suficiente para compensar la carga de sobrecalentamiento interior de la vivienda durante las horas de más calor. El sistema tiene un pico de producción que se sitúa en los 870 Wh a las 14:53.

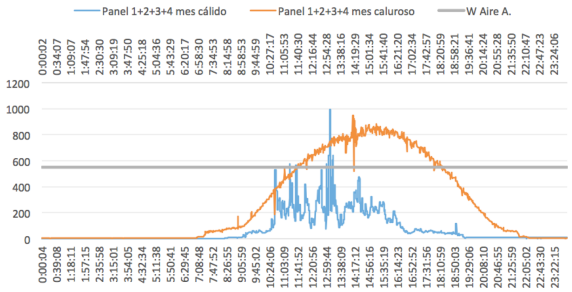


Figure 5.20. Ejemplo de producción diaria de electricidad en un sistema de cuatro paneles

5.7.2.3.8 Sistema de instrumentación y adquisición de datos

El sistema de instrumentación y adquisición de datos (SAD) desarrollado está permitiendo obtener información en tiempo real de sumo interés sobre el comportamiento de la vivienda. Disponemos de información sobre el grado de confort del aire en el interior de la vivienda (humedad y temperatura en sus estancias interiores), del clima exterior en la localización exacta de la vivienda (humedad y temperatura, irradiancia solar, velocidad y dirección del viento en el exterior de la vivienda), y por último, tanto datos de generación del sistema de energía renovable, como de consumo de la vivienda.



Figure 5.21. Ubicación de sensores en planta baja de Casa Zaranda

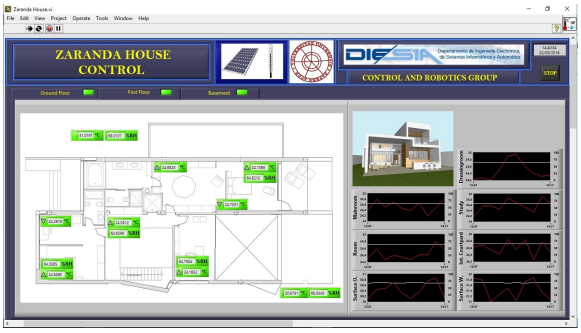


Figure 5.22. Ubicación de sensores en planta alta de Casa Zaranda

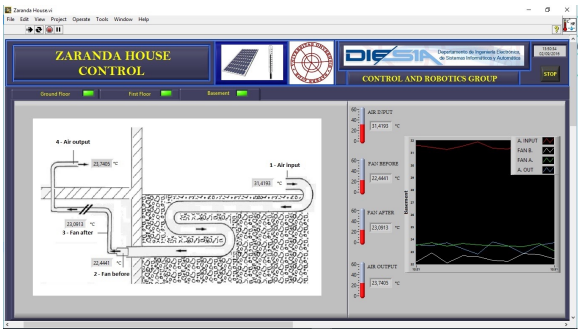


Figure 5.23. Ubicación de sensores en planta sótano de Casa Zaranda

Las figuras 5.21 a 5.23 muestran el software desarrollado para la lectura de los datos en el interior de la vivienda y la ubicación específica de los sensores en las distintas estancias.

5.7.2.4 Gestión de la construcción

Los trabajos de *project management* se realizaron de manera conjunta por el equipo técnico encargado de la dirección facultativa de la obra, formado por dos arquitectos y un arquitecto técnico. La labor de coordinación de los diferentes oficios, desarrollada por el jefe de obra de la empresa constructora, supuso igualmente una aportación muy valiosa para la calidad del resultado final de la ejecución.

5.7.2.4.1 Termografía de la envolvente

Para la comprobación de las soluciones de continuidad proyectadas en la envolvente térmica, se realizó un campaña de termografías de las que aportamos una selección en la figura 5.24.

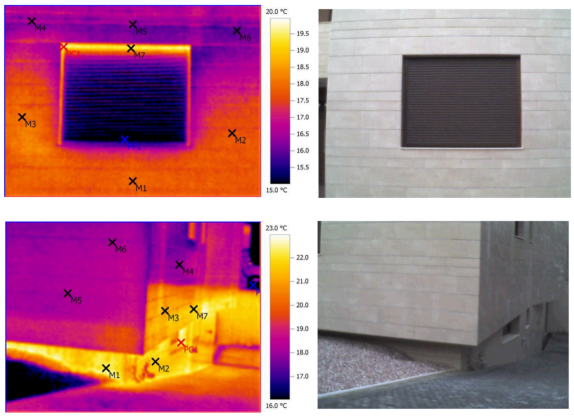


Figure 5.24. Termografías de fachada de Casa Zaranda

Esta campaña termográfica se realizó en dos fases. Una primera, previa a la ejecución del trasdosado interior de los cerramientos, para comprobar la continuidad del aislamiento térmico colocado, puso de manifiesto la existencia de algunos puntos singulares difíciles de dar solución de continuidad. En la segunda fase, realizada con la obra ya terminada, se comprobó la buena calidad de la solución final ejecutada.

5.7.2.4.2 Test de estaqueidad al aire

Para controlar la calidad de lo ejecutado se realizó un BDT en construcción, una vez instaladas las carpinterías. El motivo de este BDT inicial fue detectar problemas de mala praxis constructiva en fase inicial, de manera que se pudieran tomar las debidas medidas de subsanación de errores. Posteriormente, una vez finalizada la obra se realizó un segundo BDT definitivo.

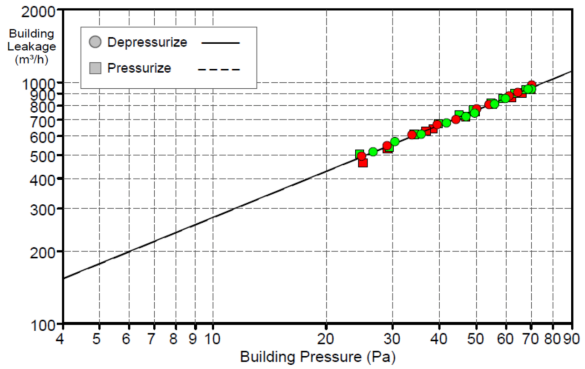


Figure 5.25. Volumen de aire a diferentes presiones en el BDT

En la figura 5.25 se representan los resultados del BDT definitivo en Casa Zaranda. El volumen total de aire a insuflar/extraer en la vivienda varía con la diferencia de presión interior exterior, resultando el valor del test expresado en renovaciones a la hora (volumen de aire insuflado en una hora partido por volumen útil interior de la vivienda) a 50 Pa.

	Depressurization	Pressurization	Average
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m³/h)	768 (+/- 0.3 %)	765 (+/- 0.4 %)	766
n50: Air Changes per Hour (1/h)	0.59	0.59	0.59
w50: m³/(h*m² Floor Area)	2.57	2.56	2.57
q50: m³/(h*m² Surface Area)	1.11	1.10	1.11
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm²)	307.9 (+/- 1.8 %)	306.5 (+/- 2.3 %)	307.2
cm²/m² Surface Area	0.44	0.44	0.44
LBL ELA @ 4 Pa (cm²)	165.8 (+/- 2.8 %)	165.0 (+/- 3.6 %)	165.4
cm²/m² Surface Area	0.24	0.24	0.24
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	64.4 (+/- 4.3 %)	64.1 (+/- 5.6 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	63.8 (+/- 4.3 %)	63.4 (+/- 5.6 %)	
Exponent (n)	0.636 (+/- 0.011)	0.636 (+/- 0.014)	
Correlation Coefficient	0.99737	0.99559	
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with: UNE 13829	
Type of Test Method:	B		
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		

Figure 5.26. Resumen de resultados del BDT en Casa Zaranda

La figura 5.26 expresa los principales valores numéricos del BDT realizado. El resultado final del test es de 0,59 h^{-1} en valor medio, coincidiendo los valores de despresurización y de presurización.

5.7.2.4.3 Control de ejecución de sistemas

Durante la fase de ejecución material de la obra, la dirección facultativa controló la correcta ejecución y la puesta en marcha de todos los sistemas y equipos. No se produjeron interferencias entre los sistemas proyectados en la ingeniería de detalle y la realidad de lo construido.

No fue necesario por tanto realizar ninguna modificación a la solución prevista. El *As built certify* fue aprobado por el *project manager* sin ninguna reserva técnica.

5.7.2.5 Mantenimiento del edificio

Tratándose de una vivienda unifamiliar, el edificio no cuenta con un servicio específico en fase de mantenimiento, recayendo las labores equivalentes de control y mantenimiento directamente en los propietarios de la vivienda. No siendo el caso más deseado, por la falta de profesionalización de la función del mantenedor, sin embargo es el más habitual en viviendas para la práctica totalidad de países de clima subtropical.

En el caso específico de Casa Zaranda, habiendo servido de soporte para la realización de esta investigación, el Grupo de investigación *TEP192 Control y Robótica* de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Huelva ha venido desarrollando las funciones de mantenimiento durante todo el periodo de desarrollo de la investigación.

5.7.2.5.1 Análisis de datos

El análisis de los datos realizado hasta la fecha concluye que el resultado en fase de operación del edificio es acorde al *facility certify* requerido.

5.7.2.5.2 Mantenimiento

Las labores de mantenimiento de los sistemas se realizan periódicamente, según el libro del edificio y el programa previsto.

5.7.2.5.3 Rehabilitación energética

Del análisis de los resultados obtenidos hasta la fecha, se desprende que por el momento no es necesario ninguna actuación de rehabilitación energética de la vivienda; ni en su envolvente, ni en sus sistemas.

5.7.3 Discusión

A continuación se discuten los resultados obtenidos en el caso experimental de Casa Zaranda y expuestos en el punto anterior, a la

vista de la metodología expuesta en las figuras 5.1, 5.2 y 5.3.

La protección solar de la fachada sur en Casa Zaranda consiguió el objetivo de evitar la entrada de radiación solar directa en periodo cálido. No obstante, en este caso el objetivo iba un poco más allá. Tratándose de una vivienda en parcela aislada, el diseño del voladizo principal sobre el salón se modificó aumentando su longitud, de manera que la terraza exterior anexa quedara igualmente protegida dado su uso como una prolongación del espacio vividero interior.

Tratándose de un voladizo de hormigón de grandes dimensiones, la eliminación de los puentes térmicos en la envolvente aumentó notablemente la repercusión de material de aislamiento en la vivienda. Para reducir al máximo su impacto económico, toda la zona bajo rasante se sacó de la envolvente térmica por tratarse de espacios destinados a garaje y almacenamiento. No obstante, los efectos beneficiosos de estar semienterrados compensaron en gran medida esta decisión, resultando espacios que funcionan muy adecuadamente como colchón térmico de la planta baja de la vivienda.

El condicionante estético impuesto por el cliente en relación al material cerámico de terminación de la fachada provocó la modificación de la solución constructiva final del cerramiento. Si en un principio se planteaba aislar la envolvente por el exterior con un sistema SATE, finalmente se optó por incorporar el material de aislamiento en la cámara del cerramiento, lo que supuso más de un quebradero de cabeza hasta conseguir que no implicase la aparición de puentes térmicos.

Las condiciones urbanísticas de separación a linderos de parcela (mínimo 7 metros a lindero de fachada y 3 metros el resto) condicionaron en gran medida el factor de forma de la vivienda. La decisión de proteger el patio con una montera mejoró la compacidad del volumen de la vivienda.

El sistema instalado de cajones de persianas por el exterior, pero registrable para su mantenimiento desde el interior (sistema de amplia implantación en la tradición constructiva española) supuso una dificultad añadida para conseguir la necesaria estanqueidad al aire de la envolvente. Igualmente se identificaron múltiples fugas localizadas de aire en el paso de los conductos de aire acondicionado a la cubierta. La puerta que da acceso al sótano desde el patio interior cubierto se diseñó panelada, quedando integrada en la partición bajo escalera, lo que motivó la necesidad de instalar *in situ* juntas de estanqueidad.

Las ventanas de accionamiento remoto instaladas en el lucernario facilitan enormemente la disipación del calor acumulado durante el día en el interior de la vivienda. Corre por cuenta del usuario la responsabilidad de abrir antes de acostarse los huecos exteriores y los huecos de paso, así como de volver a cerrarlos por la mañana temprano antes de que el sol se eleve y con él la temperatura del aire exterior. Se ha optado por la sencillez en la implantación del sistema, en detrimento de opciones más tecnológicas, al tratarse de una vivienda unifamiliar.

La iluminación natural de todos los espacios, incluso los de circulación y almacenaje, es muy recomendable, y en este caso perfectamente posible dado la configuración de la vivienda en parcela aislada.

Mucho se discutió sobre la idoneidad del sistema de ventilación a adoptar en Casa Zaranda. Optar por un VLEGE permitió garantizar el suministro continuo de aire renovado a temperatura de confort, en condiciones de máxima temperatura exterior, con un sencillo sistema de bajo coste y muy bajo consumo.

En la figura 5.18, observamos que el intercambio de calor entre el aire exterior de ventilación y el terreno, previo a su introducción en la vivienda, es muy favorable para las condiciones de clima cálido; ya que su rendimiento es máximo en las horas más calurosas del día, justo cuando el sistema se hace más necesario.

En la figura 5.19 observamos la variación de la temperatura del aire exterior a la entrada y a la salida del VLEGE, en un día cálido de verano (4

de agosto 2015). Nótese cómo la oscilación de la temperatura del aire exterior es importante, con una mínima de 21,62 ºC a las 8:15 y una máxima de 38,68 ºC a las 19:38, mientras que la temperatura del aire una vez atravesado el tubo se mantiene razonablemente constante durante todo el día en el entorno de los 25-28 ºC, incluido durante las horas de más calor que es cuando más mejora el rendimiento del sistema. En el intervalo temporal entre las 3:20 y las 11:25 comprobamos que es más conveniente apagar el sistema y favorecer la ventilación cruzada nocturna, ya que la temperatura del aire a esa hora baja por debajo de la que es capaz de producir el sistema cediendo calor al terreno.

Importante la necesidad de instalar filtros de aire, así como la de drenar el interior del tubo enterrado para dar salida al agua que pudiera acumularse en el interior. Sería interesante incluir un segundo circuito de aire con toma y admisión en zonas opuestas, que haga recircular a baja velocidad el aire interior de la vivienda hasta bajar todavía más su temperatura, igualándola con la del terreno.

Las campañas termográficas realizadas sirvieron para comprobar la correcta instalación de los aislamientos en la envolvente. La primera de ellas, realizada en una fase muy inicial de los trabajos, tenía por motivación en realidad advertir a los operarios del control efectivo a realizar y la importancia del detalle en su trabajo. Únicamente la final, realizada en condiciones de envolvente estanca y con un gradiente de temperatura interior-exterior mayor de 10ºC, tuvo efectos probatorios de la continuidad de la envolvente térmica.

Si observamos con detenimiento la figura 5.24, en seguida se aprecia que el sótano de la vivienda se encuentra fuera de la envolvente térmica. El cambio de color de la imagen revela una superficie mucho más caliente del cerramiento exterior, que es consecuencia del efecto de colchón térmico provocado por el sótano enterrado.

Los sistemas de control instalados aportan información muy valiosa para la investigación.

Desde el punto de vista de la producción de energía renovable, nótese cómo en la figura 5.20, en el intervalo entre las 11:50 y las 18:10, el sistema fotovoltaico es capaz de producir suficiente electricidad para abastecer la demanda de la máquina de refrigeración sin necesidad de acumulación, resultando perfectamente acopladas la curva de producción y la de demanda. Si añadiésemos un par de captadores fotovoltaicos más al sistema, sería fácil aumentar ese intervalo autosuficiente para refrigeración activa. Otra posibilidad para eliminar la dependencia de los sistemas activos sería incorporar acumulación de la energía producida en base a baterías.

En la figura 5.25, que representa los resultados del BDT en Casa Zaranda, se han obtenido los valores requeridos por debajo de 0,6 h^{-1}. Nótese cómo el resultado de 0,59 h^{-1} en despresurización y presurización resulta muy adecuado para una vivienda MEB.

Como desarrollo futuro del sistema, sería necesario dotar al conjunto de la instrumentación instalada de una *interface* más sencilla e intuitiva, con información directa al usuario sobre si la vivienda se está comportando o no como MEB. Información como la producción diaria de energía renovable, el consumo energético diario, la temperatura de los tanques de acumulación de ACS, y la conveniencia o no de pasar del estado de envolvente estanca a la de ventilación natural, en función de la temperatura exterior e interior (por ejemplo con un sencillo código de colores), aumentaría notablemente el acoplamiento entre usuario y vivienda, mejorando el comportamiento de Casa Zaranda en fase de servicio y reduciendo consecuentemente su consumo efectivo de energía. Esto es, sin duda, lo más parecido a un *facility management* energético a lo que podríamos aspirar en una vivienda unifamiliar privada.

5.8 CONCLUSIONES

En este quinto capítulo hemos desarrollado una metodología sistemática y ordenada para la negociación, el diseño, la construcción y la operación de MEB en clima subtropical. Esta nueva metodología se apoya directamente en los nuevos estándares de gestión BIM del edificio, especificando un LOD de sus elementos para cada una de las etapas de desarrollo del MEB.

Como primera aportación, esta nueva metodología se focaliza en clima subtropical, e integra todas las etapas de toma de decisiones; incluyendo la negociación inicial con el promotor, la fase de proyecto compuesta por el diseño arquitectónico y la ingeniería de instalaciones, la fase de construcción o ejecución material del edificio y la fase operacional y de mantenimiento.

Una segunda aportación fundamental consiste en incorporar la instrumentación y el análisis de datos como elemento esencial que da soporte a la validación de los resultados obtenidos durante la fase de ejecución del edificio.

La tercera aportación realizada en este capítulo consiste en destacar la importancia en la nueva metodología del análisis comparado de la información anual obtenida sobre el comportamiento real en servicio del edificio en su fase operativa.

Aplicar la nueva metodología propuesta al caso de Casa Zaranda, una vivienda unifamiliar aislada de construcción masiva en clima subtropical, constituye una aportación fundamental para la validación de la misma, a partir de la experiencia recabada en un edificio de nueva construcción.

Este quinto capítulo incluye, por tanto, la aplicación práctica del método propuesto al caso de un edificio de nueva planta. En él se ejemplifican las contribuciones aportadas para la persecución del objetivo del MEB, desde la arquitectura y la ingeniería.

A continuación, en el capítulo sexto de esta tesis doctoral, se aplica la misma metodología expuesta en este capítulo quinto, al caso de la rehabilitación energética de viviendas sociales. Se aplica, además, a mucha mayor escala. Ya no hablamos de vivienda o edificio individual, sino de escala territorial. Se trata, por tanto, de una nueva aplicación práctica del método ya expuesto, adaptado a los requerimientos específicos de la rehabilitación: superficie útil y altura libre limitada, condiciones de vivienda habitada, mala calidad constructiva original, factor de forma y geometría definida, etc.



Capítulo 6

Rehabilitación energética a escala territorial

6. REHABILITACIÓN ENERGÉTICA A ESCALA TERRITORIAL

El anterior capítulo de esta tesis doctoral ha propuesto una nueva metodología sistemática y ordenada para la toma de decisiones encaminada a la negociación, el proyecto, la ejecución material y la operación de edificios MEB en clima subtropical. El quinto capítulo termina aplicando la nueva metodología al caso de una vivienda unifamiliar aislada de nueva construcción en clima subtropical, denominada *Casa Zaranda*.

Sin embargo, tal como apuntamos en las conclusiones del capítulo dos, es del todo imposible reducir significativamente el consumo de energía en el sector de la edificación, sin la intervención en el parque edificado existente. Y es que la escala de las soluciones a adoptar deben estar a la altura de la gravedad de los problemas a solucionar.

En este sexto capítulo de la tesis doctoral, aplicamos la metodología expuesta en el capítulo cinco al problema de la rehabilitación energética a escala territorial. Viene a desarrollar la experiencia acumulada del Grupo de Investigación TEP192 *Control y Robótica*, en la rehabilitación energética de viviendas sociales. La mayor parte de esta experiencia proviene del trabajo desarrollado en el proyecto de I+D+i EREBA2020: *Modelo de estrategia a Largo Plazo para Movilizar Inversiones en la Renovación del Parque Nacional de Edificios Residenciales en Andalucía Orientando al Ahorro de un 20% de Energía en Horizonte 2020*, con código GGI3002IDIQ [183].

Este proyecto de investigación ha tenido como objetivo proponer una hoja de ruta, adaptada al parque construido de viviendas de Andalucía, para el seguimiento de la estrategia de reducción de consumo de energía fijada por todos los países miembros de la Unión Europea (Art. 4 de la Directiva 2012/27/UE). Esta hoja de ruta desarrollada, pone en manos de la administración un trabajo de investigación que posibilita la movilización de inversiones para la renovación del parque de edificios residenciales en Andalucía para lograr la reducción del 20% de los consumos energéticos en 2020.

En este capítulo 6 de la tesis doctoral, se establece el planteamiento de la rehabilitación energética desde una visión holística del problema, integrando los intereses de propietarios y administración. Los barrios residenciales de los años 50, 60 y 70, propios del desarrollismo urbano de las ciudades españolas en la segunda mitad del siglo pasado, constituyen hoy por hoy auténticos sumideros energéticos. Se trata por tanto de un problema que, desde nuestro punto de vista, es imprescindible tratar.

Una tesis como ésta, cuyo fin último persigue una mejora en la eficiencia energética de los edificios, debe abordar el campo de la rehabilitación por ser el principal responsable hoy por hoy de la mayor parte de la demanda de energía en el sector de la edificación. Es posible mejorar el consumo del sector avanzando hacia el objetivo de MEB en el proyecto de edificios de nueva planta, pero el verdadero objetivo estaría lejos de alcanzarse sin abordar decididamente el problema de la rehabilitación energética de los edificios existentes. Y la escala preferente de actuación para la rehabilitación energética es la escala de barrio, no la de edificio individual aislado.

Desde el punto de vista de las personas, lo que en verdad justifica la rehabilitación de viviendas sociales por parte de la Administración, no es exclusivamente la cuestión de reducir su consumo energético; sino, todavía más importante, aumentar el confort sin menoscabo de aquel. Nos estamos refiriendo a la mitigación de los efectos del concepto conocido como pobreza energética.

Muchas de las familias que habitan estas viviendas sociales, cada vez más después de esta última crisis económica y de la escalada de las tarifas eléctricas, son incapaces de afrontar el gasto que supone mantener su hogar en condiciones de habitabilidad razonable. Rehabilitar energéticamente estas viviendas, en especial en lo que se refiere al aislamiento y a las condiciones de estanqueidad de la envolvente, permitirá mejorar significativamente las condiciones de habitabilidad de las mismas,

mejorando la calidad de vida de sus habitantes y mitigando la situación de empobrecimiento energético en la que actualmente se encuentran muchas familias.

Este sexto capítulo de la tesis doctoral aporta un catálogo de soluciones específicas para la rehabilitación energética de barriadas en las ocho capitales andaluzas, ligando ahorros de energía superiores al 20% con plazos mínimos de retorno de la inversión. Se trata por tanto de una hoja de ruta apta para la toma de decisiones encaminada al cumplimiento de la estrategia europea 20/20/20.

Otra aportación fundamental de este capítulo lo constituye la demostración de que es posible transformar una vivienda social pre normativa en situación de pobreza energética, en una MEB por mediación de la rehabilitación energética, siguiendo la metodología aportada en el capítulo cinco de este mismo trabajo.

La estructura de este capítulo 6 se desarrolla siguiendo el esquema expuesto a continuación. En el primer apartado se realiza una introducción específica sobre el estado del arte en lo que se refiere a rehabilitación energética de edificios y barriadas. En el segundo apartado de este capítulo se expone el trabajo realizado en base a cinco grandes categorías: el estudio urbano de las ocho capitales andaluzas, el trabajo con los sistemas de información geográfica (SIG), el análisis de la demanda en base a las simulaciones energéticas masivas realizadas, las actuaciones de eficiencia y rehabilitación energética llevadas a cabo y, finalmente, la instrumentación y el procesamiento de datos específicamente desarrollados para realizar esta investigación. En el tercer apartado de este capítulo seis de la tesis se exponen la metodología, el equipamiento empleado y los desarrollos realizados, ordenándolos siguiendo estas mismas categorías. En el cuarto apartado se discuten los principales resultados obtenidos, y en el quinto se exponen las propuestas de actuación y se analizan sus periodos de amortización. Finalmente, en el sexto y último apartado de este capítulo 6 de la tesis doctoral se exponen las conclusiones y los desarrollos futuros del trabajo de investigación EREBA2020.

6.1 INTRODUCCIÓN

Durante las décadas de los años 50, 60 y 70, las principales ciudades de Andalucía viven un crecimiento espectacular del sector de la construcción, al amparo de la salida del sistema económico de autarquía y la primera gran industrialización de finales de los años 50, lo que provoca un éxodo masivo de población del campo a las ciudades. Sólo en la ciudad de Huelva, se llega a experimentar un aumento de su población en más de 50.000 habitantes, como consecuencia de la implantación del polo químico e industrial. La pequeña capital de provincia se convierte en ciudad intermedia (Huelva tenía 63.600 habitantes en 1950, 74.400 en 1960, 96.300 en 1970 y 127.820 en 1981); y como consecuencia de la gran demanda de mano de obra y servicios se desarrollan apresuradamente grandes barriadas de ensanche (La Orden, El Carmen, El Torrejón, Verdeluz, Fuentepiña, Los Rosales, Santa Marta, Pérez Cubillas, etc.), para acoger a una población que se esperaba podría llegar a los 250.000 habitantes. Fenómenos parecidos sucedieron igualmente en el resto de capitales andaluzas.

Como consecuencia de la necesidad acuciante de vivienda, que requería una muy rápida ejecución, se abandonaron las técnicas tradicionales de construcción en aras de una mayor eficiencia, rapidez y economía. En una época todavía anterior a la primera crisis del petróleo, poco o nada se tuvo en cuenta el factor energético como requisito en las nuevas viviendas que se construían: cerramientos sin cámara de aire, sin aislamiento interior o sin ninguna de las dos cosas, al igual que cubiertas y medianeras; carpinterías exteriores de aluminio con altísima permeabilidad al aire, sin rotura de puente térmico y con vidrio simple de 3-4 mm de espesor.

En los años estudiados en el proyecto EREBA2020, no se había desarrollado aún en España ningún tipo de legislación referente al ahorro de energía. Hubo que esperar hasta el año 1979, con la aparición de la NBE-CT-79, para que se iniciase tímidamente en nuestro país el camino de la sensibilidad medioambiental por la vía del ahorro energético. No es hasta 2006, con la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación, cuando la normativa española de obligado cumplimiento inicie con decisión el camino de la eficiencia energética en la edificación. Aún estábamos muy lejos, sin embargo, de los estándares internacionales más exigentes a día de hoy (ver *Passivhaus*, LEED, BREEAM, etc. en capítulo 2), aunque el camino ya iniciado de mejora en la exigencia era ya irreversible.

Las barriadas construidas en las décadas de los 50, 60, 70, y algunas de principios de los 80, constituyen verdaderos sumideros energéticos, por la mala calidad de las envolventes con la que fueron construidas, y por la práctica ausencia de sistemas de climatización, en ningún caso proyectados desde un mínimo criterio de eficiencia. Con el aumento de la capacidad adquisitiva de las familias, a lo largo de los años éstas han ido introduciendo progresivamente mejoras en sus viviendas, generalmente con la instalación de equipos de aire acondicionado y calefacción por bomba de calor de serie comercial tipo *split* acoplados a fachada; no acompañando estos sistemas con mejoras en la calidad de las envolventes, lo que ha producido una gran ineficiencia y un alto coste energético.

No cabe perder de vista que la economía española es dependiente en la actualidad en un 80% de la importación de energía de otros países (principalmente crudo y gas), y que ésta representa una parte muy significativa del déficit de nuestra balanza comercial con el exterior, por no hablar de las repercusiones en el mercado de las emisiones de CO_2. El ahorro de energía producido como consecuencia de la rehabilitación de nuestro parque edificado debe ser por tanto una prioridad en la actualidad, y el trabajo desarrollado en EREBA2020 persigue la determinación de las estrategias más adecuadas para conseguirlo.

En toda Europa es una seria preocupación el gran consumo de energía originado por el parque edificado. Según *Eurostat* [13], un 40% de toda la energía en la UE se utiliza en los edificios. El sector de la edificación es, además del mayor consumidor de energía, el sector con mayor potencial de ahorro energético, con un 21% hasta 2020.

Las emisiones de CO_2 se convertirán en breve (de hecho ya está ocurriendo), en uno de los principales motores para la innovación en la edificación; y evitarlas, en uno de los nuevos nichos de negocio. Debemos ser conscientes de la huella de carbono del edificio en su vida útil para actuar sobre ella, reduciéndola.

Como objetivo a corto plazo, debemos buscar el balance energético casi nulo en la construcción, si bien introduciendo energías renovables en los edificios pronto estaremos en condiciones de alcanzar el objetivo de consumo nulo e incluso el balance de energía neta positivo. La combinación adecuada y justificada de estas dos estrategias son las claves de la hoja de ruta de rehabilitación que se presenta en este capítulo.

La evolución actual del estado de la técnica recorre el camino de los edificios existentes a los edificios que reducen emisiones, y de éstos a los denominados edificios pasivos, apuntando ya al objetivo de los edificios MEB para 2020. El edificio pasa así de ser un generador de problemas, a un generador de valor.

Para la implementación práctica del proyecto, se han llevado a cabo prototipos de laboratorio de viviendas modelo (viviendas habitadas) que permiten ensayar y poner a punto las tecnologías, subsistemas y estrategias de control necesarias para la consecución de los objetivos planteados.

Desde nuestro punto de vista, lo aportado en esta investigación supone un gran avance en el diseño, optimización, fiabilidad en las previsiones de producción, y mantenimiento de las rehabilitaciones energéticas de barrios completos, ya que el bajo coste del sistema lo hace competitivo aún para pequeñas inversiones en viviendas individuales.

6.2 TRABAJO DESARROLLADO

Con objeto de estructurar el trabajo desarrollado en el proyecto, de modo que se comprenda la dimensión del mismo, desglosamos su contenido en cinco grandes bloques:

1. Estudio urbano de las ocho capitales andaluzas.
2. Sistema de información geográfica (SIG).
3. Simulaciones energéticas.
4. Actuaciones de eficiencia y rehabilitación energética.
5. Instrumentación desarrollada y procesamiento de datos.

Al final de estos cinco bloques incluimos un apartado con el análisis de los principales resultados experimentales obtenidos y otro de conclusiones.

6.2.1 Estudio urbano de las ocho capitales andaluzas

Se han geolocalizado todos los núcleos de desarrollismo urbano correspondientes a las décadas 50, 60 y 70 en las ocho capitales andaluzas. En concreto, tal y como se muestra en la figura 6.1, se han geolocalizado 372 crecimientos con un total de 293.163 viviendas. El criterio seguido para las localizaciones ha sido el de considerar agrupaciones notables por tamaño, en ningún caso inferior a 40 viviendas.

Se han realizado planos de cada capital a escala 1:8.000 y 1:15.000, según conviniera, teniendo en cuenta los tamaños de cada ciudad. Cada plano es un filtro de la capital correspondiente a la década estudiada. Así pues, se han realizado 24 planos, correspondientes a los crecimientos de los años 50, 60 y 70 para el total de las capitales andaluzas, con tres planos para cada una.

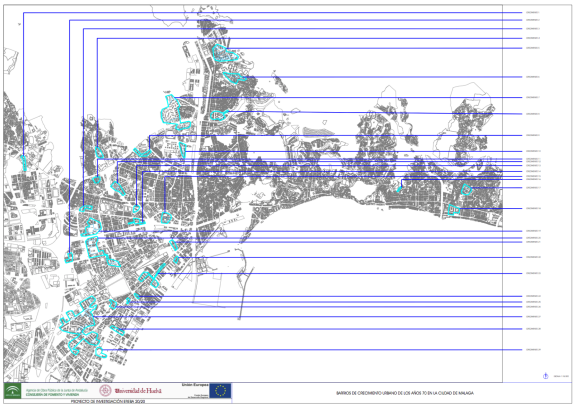


Figure 6.2. Crecimientos en la década 70 en Málaga

Como ejemplo se muestra en la figura 6.2 el plano de Málaga para la década de crecimiento de los 70. En el Anexo 6.1.1 *Análisis capitales andaluzas por décadas*, se incluyen los 24 planos realizados. Toda esta información se encuentra transferida al SIG y a la web del proyecto.

En el caso concreto de Huelva, se ha realizado además un minucioso trabajo de campo en el que se han identificado 19 viviendas como modelos de los crecimientos. No hay una correlación directa entre el número de viviendas identificadas, 19, y el número de crecimientos identificados, 23; la razón es que se han

	DÉCADA 50			DÉCADA 60			DÉCADA 70			TOTALES		
	CRECIM	NUM_BLOQ	NUM_VIV	CRECIM	NUM_BLOQ	NUM_VIV	CRECIM	NUM_BLOQ	NUM_VIV	CRECIM	NUM_BLOQ	NUM_VIV
ALMERÍA	7	146	1299	11	219	3325	15	144	4586	33	509	9210
CÁDIZ	9	143	2836	11	212	4250	8	156	6822	28	511	13908
CÓRDOBA	8	1842	4392	17	803	14088	23	953	17355	48	3598	35835
GRANADA	8	187	1640	11	1167	8873	18	512	15366	37	1866	25879
HUELVA	5	651	3121	7	478	3881	15	1016	12906	27	2145	19908
JAÉN	4	95	964	9	649	3409	10	170	4213	23	914	8586
MÁLAGA	12	1692	7703	29	1525	24318	29	1046	35344	70	4263	67365
SEVILLA	25	1848	16367	35	4704	45661	46	2441	50444	106	8993	112472
							TOTAL ANDALUCÍA:			372	22799	293163

Figura 6.1. Cuadro resumen del SIG realizado

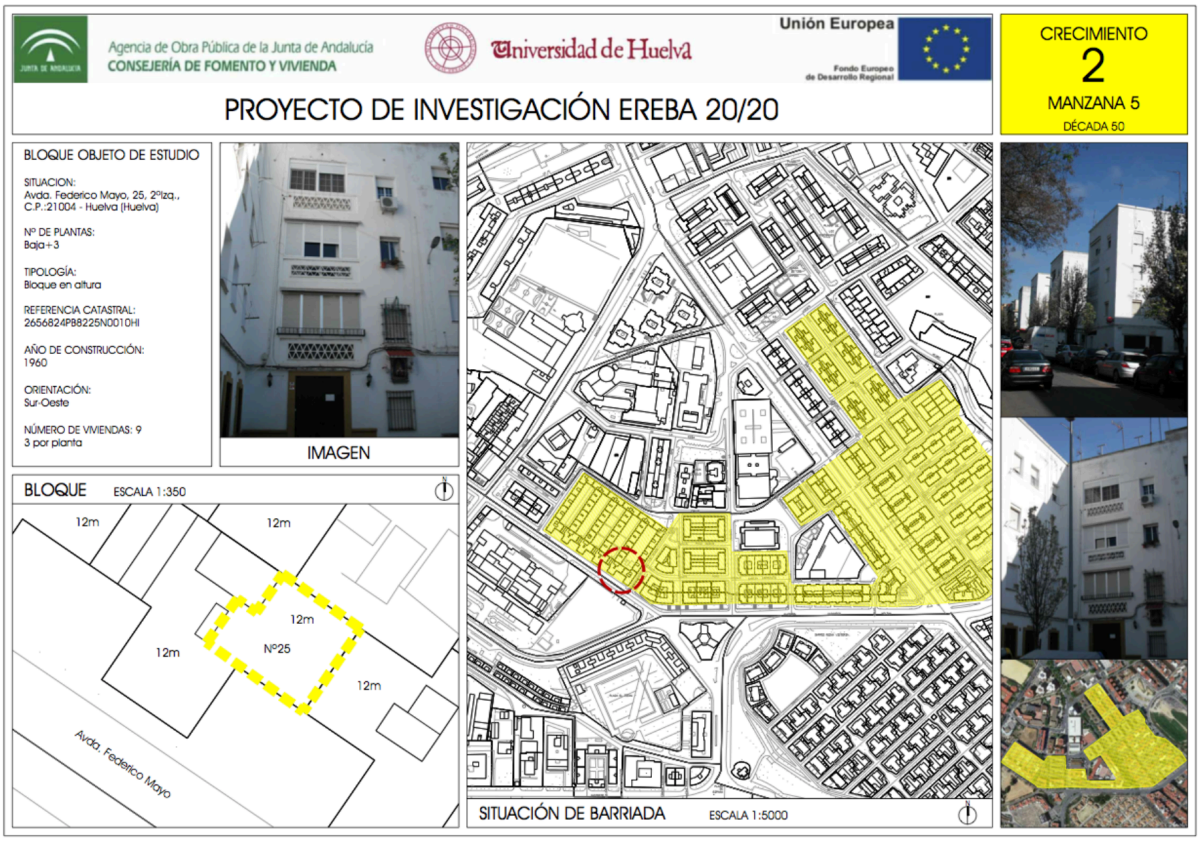


Figura 6.3. Ficha ejemplo crecimiento 2, manzana 5, en Huelva (década de los 50)

desechado tipologías similares con objeto de no repetir.

El trabajo de campo se ha plasmado en la realización de una ficha por crecimiento, y dentro de él la ficha de la vivienda modelo. En la ficha del crecimiento se muestra un plano del mismo, fotografías, así como situación, número de plantas, tipologías, referencia catastral, año de construcción, orientación y número de viviendas. En la figura 6.3 se muestra a modo de ejemplo el de un crecimiento concreto, correspondiente a los años 50.

Respecto a la ficha de la vivienda modelo, contiene un plano de la misma, fotos, así como dirección de la vivienda, situación dentro del bloque, altura libre interior, capas de cerramiento, capas de medianeras, capas de particiones interiores, capas de forjados, puentes térmicos, uso de la vivienda, equipos de frío/calor y ACS presentes en la vivienda, tipos de puertas, carpinterías de ventana y tipos de vidrio. A modo de ejemplo se muestra en la figura 6.4 la vivienda tipo elegida del crecimiento correspondiente a la figura 6.3.

En el Anexo 6.1.2 *Fichas de crecimientos urbanos y viviendas*, se incluyen el total de las fichas realizadas, cuyo número es de 38.

6.2.1.1 Medidas de transmitancia, radiación térmica y estanqueidad

Además de las fichas, las viviendas elegidas como modelo han sido sometidas a una batería de medidas para conocer su comportamiento real respecto a la eficiencia energética. Así, se ha medido la transmisividad térmica (transmitancia) de las envolventes de las 19 viviendas. En cada vivienda se ha obtenido una tabla de medidas. Asimismo, se ha implementado una gráfica para cada vivienda en la que se muestran, para el intervalo de tiempo medido, el flujo de energía a través de la envolvente (W/m^{2}K), la temperatura del muro, la temperatura en el interior de la envolvente, la temperatura en su exterior y la humedad relativa. A modo de ejemplo, se muestra en la figura 6.5 una tabla de transmitancias y en la figura 6.6 la gráfica correspondiente.

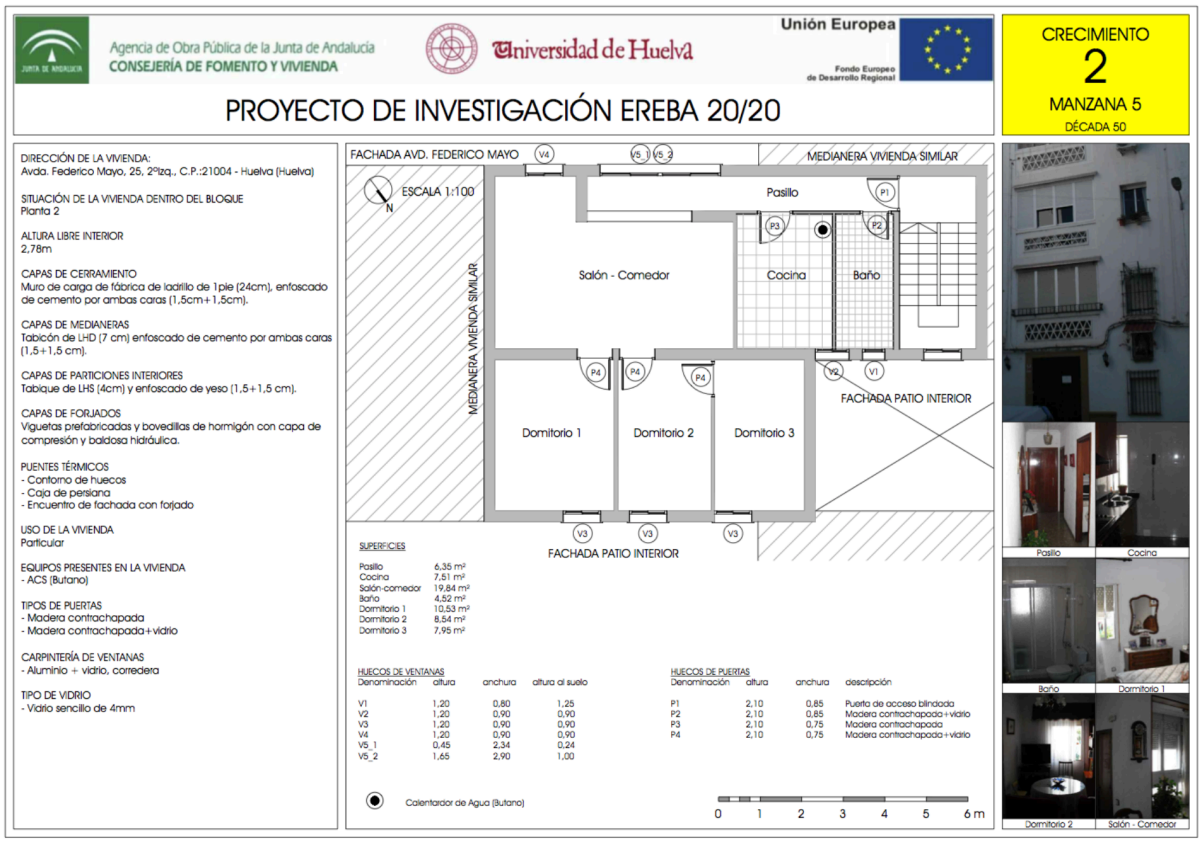
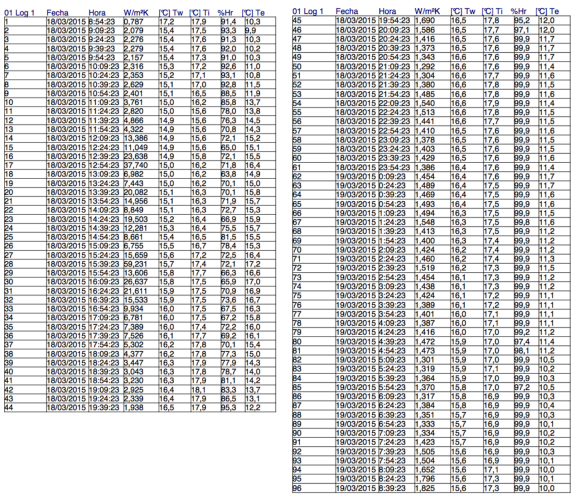


Figura 6.4. Ficha ejemplo vivienda tipo elegida, crecimiento 2, manzana 5, en Huelva (década de los 50)

Teniendo en cuenta las viviendas analizadas en campo, se dispone de 19 estudios completos de transmitancia, que se concretan en 19 tablas y 19 gráficas, las cuales están incluidas en el Anexo 6.1.3 *Medidas de transmitancia, radiación térmica y estanqueidad*. Además de esto, en las cuatro viviendas rehabilitadas, se han realizado medidas de transmitancia antes y después de la rehabilitación, con objeto de comprobar el alcance de la misma. Las tablas y gráficas correspondientes se incluyen también en el Anexo 6.1.3. Consecuentemente, esto aporta 4 tablas y 4 gráficas más.



01 Log 1	Fecha	Hora	W/m²K	[°C] Tw	[°C] Ti	%Hr	[°C] Te
1	18/03/2015	8:54:23	0,787	17,2	17,9	91,4	10,3
2	18/03/2015	9:09:23	2,079	15,4	17,5	93,3	8,9
3	18/03/2015	9:24:23	2,276	15,4	17,6	91,3	10,3
4	18/03/2015	9:39:23	2,279	15,4	17,6	92,0	10,2
5	18/03/2015	9:54:23	2,157	15,4	17,3	91,0	10,3
6	18/03/2015	10:09:23	2,316	15,3	17,2	89,6	11,0
7	18/03/2015	10:24:23	2,353	15,2	17,1	89,1	10,8
8	18/03/2015	10:39:23	2,629	15,1	17,0	92,8	11,5
9	18/03/2015	10:54:23	2,401	15,1	16,5	88,5	11,9
10	18/03/2015	11:09:23	3,761	15,0	16,2	85,8	13,7
11	18/03/2015	11:24:23	2,820	15,0	15,6	78,0	13,8
12	18/03/2015	11:39:23	4,866	14,9	15,6	76,3	14,5
13	18/03/2015	11:54:23	4,322	14,9	15,6	70,8	14,3
14	18/03/2015	12:09:23	13,386	14,9	15,6	72,1	15,2
15	18/03/2015	12:24:23	11,049	14,9	15,6	65,0	15,1
16	18/03/2015	12:39:23	23,636	14,9	15,8	72,1	15,5
17	18/03/2015	12:54:23	37,740	15,0	16,2	71,8	16,4
18	18/03/2015	13:09:23	6,982	15,0	16,2	63,8	14,9
19	18/03/2015	13:24:23	7,443	15,0	16,2	70,1	15,0
20	18/03/2015	13:39:23	20,082	15,1	16,3	70,1	15,8
21	18/03/2015	13:54:23	14,956	15,1	16,3	71,9	15,7
22	18/03/2015	14:09:23	8,849	15,1	16,3	72,7	15,3
23	18/03/2015	14:24:23	19,503	15,2	16,4	86,9	15,9
24	18/03/2015	14:39:23	12,281	15,3	16,4	75,5	15,7
25	18/03/2015	14:54:23	8,661	15,4	16,5	81,5	15,5
26	18/03/2015	15:09:23	6,755	15,5	16,7	78,4	15,3
27	18/03/2015	15:24:23	15,659	15,6	17,2	72,5	16,4
28	18/03/2015	15:39:23	59,231	15,7	17,4	72,1	17,2
29	18/03/2015	15:54:23	13,606	15,8	17,7	66,3	16,6
30	18/03/2015	16:09:23	26,637	15,8	17,5	65,9	17,0
31	18/03/2015	16:24:23	21,611	15,8	17,5	70,9	16,8
32	18/03/2015	16:39:23	15,533	15,9	17,5	73,6	16,7
33	18/03/2015	16:54:23	9,934	16,0	17,5	67,5	16,3
34	18/03/2015	17:09:23	6,781	16,0	17,5	67,2	15,8
35	18/03/2015	17:24:23	7,389	16,0	17,4	72,2	16,0
36	18/03/2015	17:39:23	7,526	16,1	17,7	69,2	16,1
37	18/03/2015	17:54:23	5,302	16,2	17,8	70,1	15,4
38	18/03/2015	18:09:23	4,377	16,2	17,8	77,3	15,0
39	18/03/2015	18:24:23	3,447	16,3	17,9	77,9	14,3
40	18/03/2015	18:39:23	3,043	16,3	17,8	78,7	14,0
41	18/03/2015	18:54:23	3,230	16,3	17,9	81,1	14,2
42	18/03/2015	19:09:23	2,925	16,4	18,1	83,3	13,7
43	18/03/2015	19:24:23	2,339	16,4	17,9	86,5	13,1
44	18/03/2015	19:39:23	1,938	16,5	17,9	95,3	12,2

01 Log 1	Fecha	Hora	W/m²K	[°C] Tw	[°C] Ti	%Hr	[°C] Te
45	18/03/2015	19:54:23	1,690	16,5	17,8	95,2	12,0
46	18/03/2015	20:09:23	1,586	16,5	17,7	97,1	12,0
47	18/03/2015	20:24:23	1,416	16,5	17,6	99,9	11,7
48	18/03/2015	20:39:23	1,373	16,5	17,6	99,9	11,7
49	18/03/2015	20:54:23	1,343	16,6	17,6	99,9	11,7
50	18/03/2015	21:09:23	1,292	16,6	17,6	99,9	11,4
51	18/03/2015	21:24:23	1,304	16,6	17,7	99,9	11,6
52	18/03/2015	21:39:23	1,380	16,6	17,8	99,9	11,5
53	18/03/2015	21:54:23	1,485	16,6	17,8	99,9	11,6
54	18/03/2015	22:09:23	1,540	16,6	17,9	99,9	11,4
55	18/03/2015	22:24:23	1,513	16,6	17,8	99,9	11,5
56	18/03/2015	22:39:23	1,461	16,6	17,7	99,9	11,5
57	18/03/2015	22:54:23	1,410	16,5	17,6	99,9	11,6
58	18/03/2015	23:09:23	1,378	16,5	17,6	99,9	11,5
59	18/03/2015	23:24:23	1,403	16,5	17,6	99,9	11,5
60	18/03/2015	23:39:23	1,429	16,5	17,6	99,9	11,6
61	18/03/2015	23:54:23	1,386	16,4	17,6	99,9	11,4
62	19/03/2015	0:09:23	1,454	16,4	17,6	99,9	11,7
63	19/03/2015	0:24:23	1,489	16,4	17,5	99,9	11,7
64	19/03/2015	0:39:23	1,469	16,4	17,5	99,9	11,6
65	19/03/2015	0:54:23	1,493	16,4	17,5	99,9	11,6
66	19/03/2015	1:09:23	1,494	16,3	17,5	99,9	11,5
67	19/03/2015	1:24:23	1,548	16,3	17,5	99,9	11,6
68	19/03/2015	1:39:23	1,413	16,3	17,5	99,9	11,2
69	19/03/2015	1:54:23	1,400	16,3	17,4	99,9	11,2
70	19/03/2015	2:09:23	1,424	16,2	17,4	99,9	11,2
71	19/03/2015	2:24:23	1,460	16,2	17,4	99,9	11,3
72	19/03/2015	2:39:23	1,519	16,2	17,3	99,9	11,5
73	19/03/2015	2:54:23	1,454	16,1	17,3	99,9	11,2
74	19/03/2015	3:09:23	1,438	16,1	17,3	99,9	11,2
75	19/03/2015	3:24:23	1,424	16,1	17,2	99,9	11,1
76	19/03/2015	3:39:23	1,389	16,1	17,2	99,9	11,1
77	19/03/2015	3:54:23	1,401	16,0	17,1	99,9	11,1
78	19/03/2015	4:09:23	1,387	16,0	17,1	99,9	11,1
79	19/03/2015	4:24:23	1,416	16,0	17,0	99,2	11,2
80	19/03/2015	4:39:23	1,472	15,9	17,0	97,4	11,4
81	19/03/2015	4:54:23	1,473	15,9	17,0	98,1	11,2
82	19/03/2015	5:09:23	1,301	15,9	17,0	99,9	10,5
83	19/03/2015	5:24:23	1,319	15,9	17,1	99,9	10,2
84	19/03/2015	5:39:23	1,364	15,9	17,0	99,9	10,3
85	19/03/2015	5:54:23	1,370	15,8	17,0	97,2	10,5
86	19/03/2015	6:09:23	1,317	15,8	16,9	99,9	10,3
87	19/03/2015	6:24:23	1,384	15,8	16,9	99,9	10,4
88	19/03/2015	6:39:23	1,351	15,7	16,9	99,9	10,3
89	19/03/2015	6:54:23	1,333	15,7	16,9	99,9	10,1
90	19/03/2015	7:09:23	1,334	15,7	16,9	99,9	10,2
91	19/03/2015	7:24:23	1,423	15,7	16,9	99,9	10,2
92	19/03/2015	7:39:23	1,505	15,6	16,9	99,9	10,3
93	19/03/2015	7:54:23	1,504	15,6	16,9	99,9	10,1
94	19/03/2015	8:09:23	1,652	15,6	17,1	99,9	10,0
95	19/03/2015	8:24:23	1,796	15,6	17,3	99,9	10,1
96	19/03/2015	8:39:23	1,825	15,6	17,3	99,9	10,0

Figure 6.5. Ejemplo de tabla de transmitancias

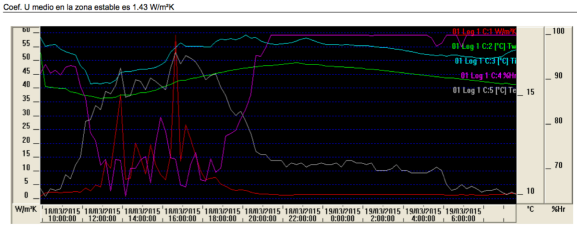
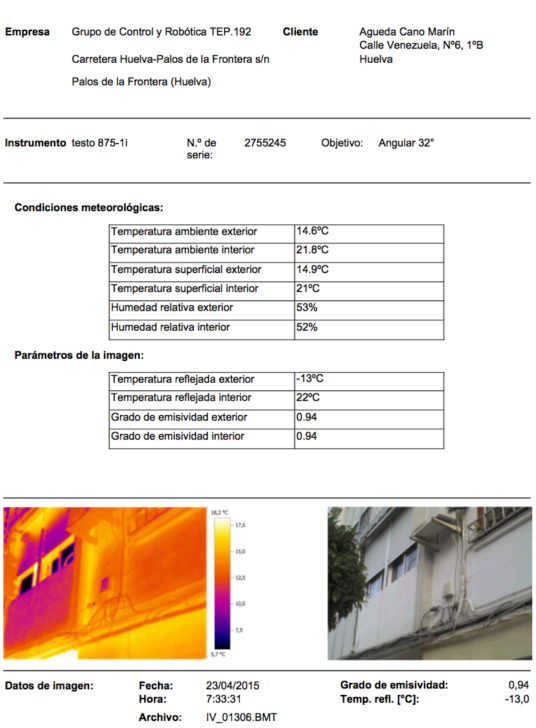


Figure 6.6. Gráfica correspondiente a la tabla 6.5

Además de las medidas de transmitancia en la envolvente de las viviendas, se ha realizado también en las mismas medidas de radiación térmica, para lo cual se han llevado a cabo termografías de las 19 viviendas tipo. Además, en las cinco viviendas rehabilitadas, se han realizado termografías antes y después de la rehabilitación, con objeto de comparar los resultados de ésta. A modo de ejemplo, en la



Empresa Grupo de Control y Robótica TEP.192 — **Cliente** Agueda Cano Marín
Carretera Huelva-Palos de la Frontera s/n — Calle Venezuela, Nº6, 1ºB
Palos de la Frontera (Huelva) — Huelva

Instrumento testo 875-1i — N.º de serie: 2755245 — Objetivo: Angular 32°

Condiciones meteorológicas:

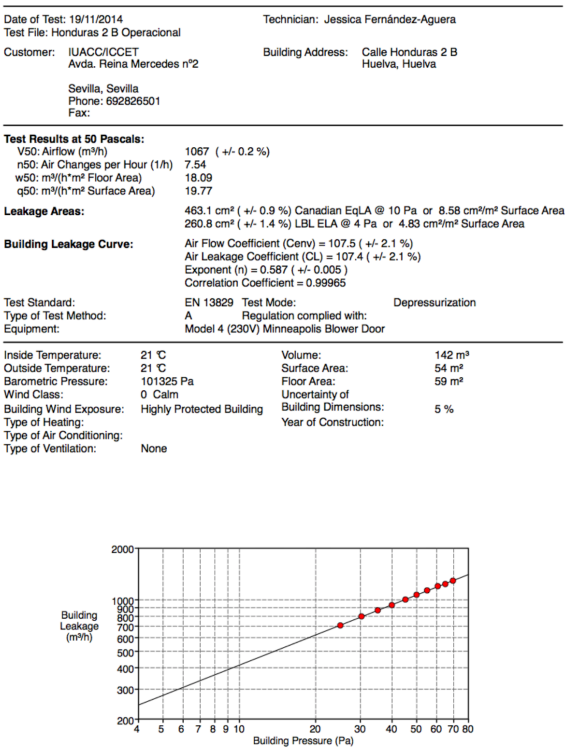
Temperatura ambiente exterior	14.6ºC
Temperatura ambiente interior	21.8ºC
Temperatura superficial exterior	14.9ºC
Temperatura superficial interior	21ºC
Humedad relativa exterior	53%
Humedad relativa interior	52%

Parámetros de la imagen:

Temperatura reflejada exterior	-13ºC
Temperatura reflejada interior	22ºC
Grado de emisividad exterior	0.94
Grado de emisividad interior	0.94

Datos de imagen: **Fecha:** 23/04/2015 **Hora:** 7:33:31 **Archivo:** IV_01306.BMT — **Grado de emisividad:** 0,94 **Temp. refl. [ºC]:** -13,0

Figura 6.7. Página de inicio de un estudio termográfico tipo



Date of Test: 19/11/2014 — Technician: Jessica Fernández-Aguera
Test File: Honduras 2 B Operacional
Customer: IUACC/ICCET, Avda. Reina Mercedes nº2, Sevilla, Sevilla, Phone: 692826501, Fax: — Building Address: Calle Honduras 2 B, Huelva, Huelva

Test Results at 50 Pascals:

V50: Airflow (m³/h)	1067 (+/- 0.2 %)
n50: Air Changes per Hour (1/h)	7.54
w50: m³/(h*m² Floor Area)	18.09
q50: m³/(h*m² Surface Area)	19.77

Leakage Areas: 463.1 cm² (+/- 0.9 %) Canadian EqLA @ 10 Pa or 8.58 cm²/m² Surface Area
260.8 cm² (+/- 1.4 %) LBL ELA @ 4 Pa or 4.83 cm²/m² Surface Area

Building Leakage Curve: Air Flow Coefficient (Cenv) = 107.5 (+/- 2.1 %)
Air Leakage Coefficient (CL) = 107.4 (+/- 2.1 %)
Exponent (n) = 0.587 (+/- 0.005)
Correlation Coefficient = 0.99965

Test Standard: EN 13829 — Test Mode: Depressurization
Type of Test Method: A — Regulation complied with:
Equipment: Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door

Inside Temperature:	21 ℃	Volume:	142 m³
Outside Temperature:	21 ℃	Surface Area:	54 m²
Barometric Pressure:	101325 Pa	Floor Area:	59 m²
Wind Class:	0 Calm	Uncertainty of	
Building Wind Exposure:	Highly Protected Building	Building Dimensions:	5 %
Type of Heating:		Year of Construction:	
Type of Air Conditioning:			
Type of Ventilation:	None		

Figura 6.8. Página de inicio de un estudio BDT tipo

figura 6.7 se muestra la página de inicio de uno de los estudios termográficos realizados. En el citado Anexo 6.1.3 se incluyen todos los estudios termográficos realizados, 19 en total.

Por último, en este apartado se han realizado también medidas de estanqueidad de las viviendas rehabilitadas, aplicando la metodología BDT. Además, hemos puesto en marcha una técnica de muy bajo coste para comprobar el grado de eficiencia obtenido actuando únicamente sobre el sellado de la viviendas existentes, sin realizar ningún tipo de actuación; así, en una de las viviendas rehabilitadas se ha realizado el BDT para ir detectando los puntos de fuga de estanqueidad en tiempo real, con objeto de ir sellando los mismos. De esta forma hemos complementado el test y el sellado para garantizar la estanqueidad práctica de la vivienda. Esta técnica ha sido llevada a cabo en una de las viviendas rehabilitadas, y los resultados se analizan y muestran en el apartado correspondiente de este capítulo. Los informes correspondientes a los test de estanqueidad realizados se incluyen en el citado Anexo 6.1.3. A modo de ejemplo, se muestra en la figura 6.8 la primera página de uno de los estudios realizados.

Debemos mencionar respecto de los BDT que, aunque no estaba prevista su realización en la memoria inicial del proyecto, hemos podido llevarlos a cabo gracias a la colaboración del grupo de Investigación TEP130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía de la Universidad de Sevilla.

6.2.2 Sistema de información geográfica

Se ha desarrollado un Sistema de Información Geográfica (SIG) para el proyecto. El alcance del SIG es total, de modo que junto a la página WEB recoge toda la información referente al proyecto. Este SIG ha sido desarrollado conforme a las prescripciones del Servicio de Cartografía de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía, de modo que la estructura de datos es totalmente compatible con la que utiliza este servicio. Como sistema de proyección se ha utilizado el Datum ETRS89_Zona 30 para todo el dominio andaluz, por lo que se ha procedido al cambio de Huso,

NOMBRE	TIPO	LONGITUD	DESCRIPCIÓN
FID	O ID	4	Número secuencial asignado automáticamente
Shape	POLYGON	0	Tipología geométrica. Campo generado automáticamente
DECADA	NUMBER	4	Década de construcción de los crecimientos seleccionados (50, 60, 70). Hace referencia a la década en la que fueron construidas la mayor parte de las parcelas catastrales que integran el crecimiento al que pertenece el registro dado.
CRECIM	STRING	20	Código asignado a cada crecimiento. Los dos primeros dígitos hacen referencia a la capital de provincia en la que se encuentra. Los dígitos 4 y 5 denotan la década de construcción.
TIP_CRE	STRING	50	Tipologías descritas en cada crecimiento (Manzana, Unifamiliar).
TIP_EDI	STRING	50	Tipologías de edificación descritas en cada crecimiento (Bloque, Hilera).
ALT_EDI	STRING	20	Altura de edificación. Información catastral de las alturas máximas asignadas a las viviendas que conforman cada crecimiento.
NUM_BLOQ	NUMBER	4	Número de bloques totales incluidos en cada crecimiento.
NUM_VIV	NUMBER	4	Número de viviendas totales incluidas en cada crecimiento.
IMAGEN	STRING	50	Enlace a imagen representativa del tipo de bloque incluido en cada crecimiento.

Tabla 6.1. Clasificación de crecimientos por décadas para todas las capitales andaluzas

de 29 a 30, de toda la información generada en las ciudades de Huelva y Cádiz.

Se ha geolocalizado cartográficamente con el sistema SIG desarrollado las agrupaciones (en unos casos coincidentes con barrios completos y en otros no) de crecimiento urbano en el intervalo desde los años 50 hasta comienzos de los 80 (construcciones comenzadas en los años 70 y terminadas a principios de los 80) en las 8 capitales andaluzas. El criterio de localización ha sido el de considerar agrupaciones notables, tanto por sus características como por su tamaño, que en ningún caso ha sido menor a 40 viviendas. En total (ver figura 6.1) se han

NOMBRE	TIPO	LONGITUD	DESCRIPCIÓN
FID	O ID	4	Número secuencial asignado automáticamente
Shape	POLYGON	0	Tipología geométrica. Campo generado automáticamente.
DECADA	NUMBER	4	Década de construcción de la parcela catastral seleccionada (50, 60, 70).
A_CONST	NUMBER	4	Año de construcción de la parcela catastral. Hace referencia al año de construcción del local principal, o en su defecto, al año de la reforma principal.
CRECIM	STRING	20	Código de crecimiento en el que se incluye la parcela catastral.
MANZANA	STRING	20	Número de manzana del crecimiento en el que se incluye la parcela catastral. Está ligado al valor del campo CRECIM
TIP_CRE	STRING	20	Tipología de crecimiento (Manzana, Unifamiliar).
TIP_EDI	STRING	20	Tipología de edificación (Bloque, Hilera).
ALT_EDI	STRING	20	Altura de edificación. Información catastral de la altura máxima asignada a cada vivienda.
NUM_VIV	NUMBER	4	Número de viviendas incluidas en cada referencia catastral.
P_R_E	STRING	20	Propuesta de Rehabilitación Energética *
TAB_PRE	STRING	50	Enlace a la taba resumen de las combinaciones de actuaciones analizadas
PRE_UNI	FLOAT	4/3	Precio unitario (€) de la actuación
REF_CAT	STRING	50	Referencia catastral de cada parcela seleccionada.

Tabla 6.2. Clasificación de parcelas catastrales dentro de cada agrupación

NOMBRE	TIIPO	LONGITUD	DESCRIPCIÓN
FID	O ID	4	Número secuencial asignado automáticamente
Shape	POLYGON	0	Tipología geométrica. Campo generado automáticamente.
Id	NUMBER	6	Número asignado a cada vivienda estudiada
DIRECCION	STRING	254	Código, denominación y número de la vía
REF_CAT	STRING	50	Referencia catastral.
A_CONST	NUMBER	4	Año de construcción de la vivienda. Hace referencia al año de construcción del local principal, o en su defecto, al año de la reforma principal.
DECADA	NUMBER	4	Código de crecimiento en el que se incluye la vivienda.
ORIENT	STRING	20	Número de manzana del crecimiento en el que se incluye la vivienda.
SITUACION	STRING	20	Situación de la vivienda estudiada dentro del Bloque.
ALT_LIB	STRING	20	Altura libre.
C_CERRA	STRING	250	Descripción de las capas de cerramiento.
C_MEDIA	STRING	200	Descripción de las capas medianeras.
C_P_INT	STRING	200	Descripción de las capas de particiones.
C_FORJ	STRING	200	Descripción de las capas de forjado.
P_TERM	STRING	200	Naturaleza de los puentes térmicos existentes.
USO_VIV	STRING	20	Uso habitual de la vivienda.
EQUIPOS	STRING	200	Equipos energéticos instalados en la vivienda.
T_PUER	STRING	100	Descripción del tipo de puertas instaladas de la vivienda.
T_VENT	String	100	Descripción del tipo de ventanas instaladas en la vivienda.
T_VIV	String	100	Descripción del tipo de vidrios instalados en la vivienda.
F_URB	String	50	Enlace a la ficha con los detalles de la urbanización en la que se incluye cada vivienda.
F_VIV	String	50	Enlace a la ficha con los datos constructivos de la vivienda.
CRECIM	String	20	Código de crecimiento en el que se incluye la vivienda
TIP_CREC	String	20	Tipología de crecimiento.
TIP_EDI	String	20	Tipología de edificación.
B_D_TEST	String	50	Enlace a los datos de los test de estanqueidad del aire realizados en la vivienda.
TERMOGRA	String	50	Enlace a la termografía realizada en la fachada de la vivienda para determinar las fugas térmicas.
TRANSMI	String	50	Enlace a las medidas de transmisividad térmica de la envolvente de la vivienda.
REHAB	String	50	Enlace a la rehabilitación realizada (WEB)

Tabla 6.3. Clasificación de información referente a las 19 viviendas analizadas de forma pormenorizada

geolocalizado 372 crecimientos con un total de 293.163 viviendas. El acceso a la información de cada una de ellas se realiza a través de un GIS implementado en el proyecto y que constituye uno de sus resultados (ver enlace en Anexo 6.2.1 y página web del proyecto).

Se ha desarrollado una cartografía vectorial específica para este proyecto, la cual es accesible desde el SIG y se presenta en tres tablas o capas, dos aplicables a todo el territorio andaluz y una centrada geográficamente en la ciudad de Huelva. Las tablas combinan información generada durante el desarrollo del proyecto con información procedente de la Dirección General de Catastro, tanto en formato vectorial como alfanumérico. La tabla 6.1 (denominada CREC en el SIG) presenta la clasificación de crecimientos por décadas para todas las capitales andaluzas, con lo cual es una capa del SIG común para todas ellas. La tabla 6.2 (denominada PAR_CAT en el SIG) presenta las parcelas catastrales dentro de cada agrupación (polígono) de crecimiento. Esta

NOMBRE	TIPO	LONGITUD	DESCRIPCIÓN
OID	O ID	4	Número secuencial asignado automáticamente
P_R_E	String	6	Código de Propuesta de Rehabilitación Energética
COMB	String	3	Combinación PRE
CER	String	4	Tipo de Cerramiento considerado.
N50	Number	3	Número de renovaciones hora a 50 Pa de diferencia de presión interior exterior en el Blower door test
RECCALOR	String	1	Existencia o no de sistema de ventilación forzada de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia
MARCO	String	10	Descripción del tipo de marco considerado en la simulación
VIDRIO	String	8	Descripción del tipo de vidrios considerados en la simulación.
CAL	Number	4	Valor simulado de reducción de demanda en calefacción. Valores en kWh/m^2 año
CAL_RED	Number	4	Porcentaje de reducción de demanda en calefacción.
REF	Number	5	Valor simulado de reducción de demanda en refrigeración. Valores en kWh/m^2 año
REF_RED	Number	4	Porcentaje de reducción de demanda en refrigeración.

Tabla 6.4. Información sobre parámetros y resultados de las simulaciones energéticas realizadas

capa también es común para las 8 capitales e incluye además la recomendación de rehabilitación energética junto al coste de la misma. Por último, la tabla 6.3 (denominada VIV_HU en el SIG), muy específica, sólo se tiene en Huelva, ya que entra en el nivel de interior de vivienda particular. En esta capa está la información referente a las 19 viviendas analizadas de forma pormenorizada (visitadas, croquizadas, con fichas individualizadas, etc.) y las actuadas. En esta capa se ha generado tanta documentación que sería imposible manejar desde el SIG. Por ello, cuando procede se enlaza desde el SIG a la página WEB, donde con los permisos debidos sí está toda la documentación.
Además de las tablas 6.1 a 6.3 anteriores, se incluye una cuarta tabla no georreferenciada (denominada PRE) con información sobre parámetros y resultados de las simulaciones energéticas realizadas en el marco del proyecto

6.2.3 Simulaciones energéticas

Se ha caracterizado el consumo energético de 264 casos de estudio (ubicación geográfica de la vivienda, orientación y tipo de demanda, bien sea ésta de refrigeración o de calefacción), que abarcan todas las capitales andaluzas, con al menos 33 casos por ciudad.

Las simulaciones energéticas han sido realizadas con la aplicación informática *Designbuilder*^{TM}, utilizando el motor de cálculo *EnergyPlus*^{TM}. Entre todas las herramientas informáticas previstas inicialmente en la memoria del proyecto, se ha decidido ésta por las razones siguientes:

- Posibilidad de introducir todo tipo de variantes y casos específicos que son propios de este proyecto y muy difíciles de tratar con otras aplicaciones.

- Amplio reconocimiento internacional que la convierte de facto en un estándar en el ámbito profesional.

- Aval del Departamento de Energía de E.E.U.U., cuya visibilidad internacional lo convierte en referencia para el mundo de la investigación en el ámbito del proyecto.

- Refleja de forma fehaciente la dinámica del sistema objeto de estudio (vivienda), incorporando todos los *imputs* que surgen en tiempos de simulación y reflejando en el comportamiento del sistema su influencia.

- Los archivos de salida, tanto numéricos como gráficos, son de gran calidad, y contienen mucha información de carácter científico.

La simulación energética ha constado de los procesos siguientes.

6.2.3.1 Análisis de componentes

Se ha realizado un análisis de componentes en las envolventes térmicas de las viviendas, tanto en estado actual como en fase de rehabilitación. Este análisis incluye una sección tipo descriptiva, un diagrama de *Glaser* en temperaturas y presiones parciales, y los valores de transmitancia térmica, resistencia térmica, transferencia conectiva y transferencia radiante.

En total se han caracterizado higrotérmicamente ocho tipos distintos de cerramientos en estado inicial, según otros tantos identificados en las fichas de las viviendas visitadas. Para cada uno de esos cerramientos se han caracterizado tres variantes diferentes, correspondientes a tres actuaciones de rehabilitación tipo con sistemas de aislamiento térmico por el exterior, con espesores de aislamiento de 5, 10 y 15 cm.

En el Anexo 6.3.1 *Análisis de componentes* se recoge, en formato de ficha resumen, las características higrotérmicas de las distintas envolventes estudiadas (antes y después de la rehabilitación), en cerramientos, particiones y medianeras. En total 39 fichas resumen.

6.2.3.2 Análisis de combinaciones factibles

Se establecen cinco categorías de intervención para la rehabilitación energética de las viviendas, cada una de las cuales está a su vez dividida en diferentes subcategorías:

1. Sustitución de ventanas (S/N).

2. Sellado de envolvente (n50 = 1, 3 ó 5 renov/h).

3. Tipo de marco de ventana (Al sin RPT, Uf = 2,4 W/m²K y Uf = 1,4 W/m²K).

4. Tipo de vidrio de ventana (Ug = 1 W/m²K, Ug = 0,6 W/m²K).

5. Tipo de aislamiento térmico exterior (SATE LM 5 cm, SATE LM 10 cm y SATE LM 15 cm y pintura reflexiva).

De combinar las diferentes actuaciones anteriores aplicando un criterio de racionalidad constructiva resultan un total de 39 actuaciones posibles (tabla 6.5), una para cada capital andaluza (en total 312 combinaciones).

Los criterios de factibilidad aplicados han sido:

- No se considera real la posibilidad de colocar un SATE de 15 cm de aislamiento sin actuar también en las carpinterías.

- Manteniendo las carpinterías originales no se considera posible bajar las infiltraciones por debajo de las 3 renov/h a 50Pa.

- No se considera coherente la colocación de una carpintería de muy altas prestaciones sin actuar a la vez en el cerramiento.

- Actuando en el cerramiento y las carpinterías a la vez, se reduce la permeabilidad al aire por debajo de las 5 renov/h a 50 Pa).

La tabla 6.6 recoge a modo de resumen el conjunto de actuaciones de rehabilitación energética planificadas para el estudio de la demanda energética en cada una de las ocho capitales andaluzas.

En el Anexo 6.3.2 *Análisis de combinaciones factibles* se incluyen con mayor escala y detalle las tablas 6.5 y 6.6 incorporadas en este epígrafe.

					ESTADO PREVIO	5 cm SATE	10 cm SATE	15 cm SATE	Pintura Reflexiva
				ESTADO PREVIO	A0				
SIN CAMBIAR VENTANAS		SÓLO ACTUANDO EN CERRAMIENTO	Al sin RPT, 4mm, 5 renov/h	5cm SATE	A1				
				10cm SATE	A2				
				15cm SATE	(*1)				
				Pintura reflexiva	A3				
		CERRAMIENTO Y SELLANDO	Al sin RPT, 4mm, 3 renov/h	5cm SATE	A4				
				10cm SATE	A5				
				15cm SATE	A6				
				Pintura reflexiva	A7				
		SÓLO SELLANDO	Al sin RPT, 4 mm	3 renov/h	A8				
				2 renov/h	(*2)				
				1 renov/h					
CAMBIANDO VENTANAS	SIN SELLAR	n50 = 5 renov/h	Uf=2,4	Ug=1	A9	(*4)			
			Uf=1,4	Ug=1	(*3)				
				Ug=0,6					
	SELLANDO	n50 = 3 renov/h	Uf=2,4	Ug=1	A10	A16	A22	A28	A34
			Uf=1,4	Ug=1	A11	A17	A23	A29	A35
				Ug=0,6	A12	A18	A24	A30	A36
		n50 = 1 renov/h	Uf=2,4	Ug=1	A13	A19	A25	A31	A37
			Uf=1,4	Ug=1	A14	A20	A26	A32	A38
				Ug=0,6	A15	A21	A27	A33	A39

Tabla 6.5. Análisis de combinaciones factibles

COMBINACIONES POSIBLES DE ACTUACIONES EN VIVIENDAS

	CERRAMIENTO	n50	Rec.Calor	MARCO	VIDRIO
A0	C1	5	-	AL sin rpt	4mm
A1	C1.1	5	-	AL sin rpt	4mm
A2	C1.2	5	-	AL sin rpt	4mm
A3	C1.4	5	-	AL sin rpt	4mm
A4	C1.1	3	-	AL sin rpt	4mm
A5	C1.2	3	-	AL sin rpt	4mm
A6	C1.3	3	-	AL sin rpt	4mm
A7	C1.4	3	-	AL sin rpt	4mm
A8	C1	3	-	AL sin rpt	4mm
A9	C1	5	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A10	C1	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A11	C1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1
A12	C1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6
A13	C1	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A14	C1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1
A15	C1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6
A16	C1.1	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A17	C1.1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1
A18	C1.1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6
A19	C1.1	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A20	C1.1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1
A21	C1.1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6
A22	C1.2	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A23	C1.2	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1
A24	C1.2	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6
A25	C1.2	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A26	C1.2	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1
A27	C1.2	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6
A28	C1.3	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A29	C1.3	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1
A30	C1.3	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6
A31	C1.3	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A32	C1.3	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1
A33	C1.3	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6
A34	C1.4	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A35	C1.4	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1
A36	C1.4	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6
A37	C1.4	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1
A38	C1.4	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1
A39	C1.4	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6

Tabla 6.6. Resumen del conjunto de actuaciones de rehabilitación energética planificadas

6.2.3.3 Estudios previos por capitales

Para el análisis climático por capitales se han escogido los archivos de la base de datos del *EnergyPlus Energy Simulation Software*, dependiente del *U.S. Department of Energy*.

Resumida en la tabla 6.7, para cada una de las capitales andaluzas, se ha estudiado la demanda máxima de energía en función de su orientación (N, S, E, O), y si se trata de una carga de calefacción (invierno) o de refrigeración (verano). Para ello se ha elegido una vivienda prototipo, correspondiente con la vivienda nº 2 de las estudiadas (ver ficha informativa de la vivienda en Anexo 6.1.2), con una superficie total de 59,29 m^2.

Del resumen del estudio de casos de la tabla 6.7 se seleccionan aquellas orientaciones y tipo de demanda pésimas (una por capital). La tabla 6.7 también resume la orientación pésima por tipo de demanda y capital de provincia.

En el Anexo 6.3.3 *Estudios previos por capitales* se incluyen con mayor escala y detalle las tablas 6.5, 6.6 y 6.7 incorporadas en este epígrafe.

6.2.3.4 Análisis de la reducción de la demanda

Se ha analizado el porcentaje de reducción de la demanda energética de la vivienda para el tipo de demanda pésima, en cada una de las 33 actuaciones de rehabilitación factibles, en cada una de las ocho capitales de provincia. En total 528 análisis de porcentajes de reducción de la demanda basados en otras tantas simulaciones energéticas.

En cada una de las ocho tablas resumen por capitales aportadas en el Anexo 6.3.4 *Análisis de reducción de la demanda* se han marcado

VIV. 2, Estado Previo		ESTUDIOS PREVIOS DE DEMANDAS							
		NORTE		OESTE		SUR		ESTE	
		Calef.	Refrig.	Calef.	Refrig.	Calef.	Refrig.	Calef.	Refrig.
ID.	Capital de Provincia	Wh/m2 año	Wh/m2 año	Wh/m2 año	Wh/m2 año	Wh/m2 año	Wh/m2 año	Wh/m2 año	Wh/m2 año
EP_AL	ALMERÍA	10018,90	-15610,23	11401,15	-19807,09	9576,62	-15576,72	11629,44	-19553,72
EP_CA	CÁDIZ	20266,14	-3622,06	19774,78	-7099,703	20244,74	-3169,051	19807,36	-6497,67
EP_CO	CÓRDOBA	26558,18	-15443,61	28599,19	-19096,26	25910,14	-15408,29	28963,92	-18861,32
EP_GR	GRANADA	47244,89	-7828,42	48941,90	-10870,97	46493,55	-7798,71	49374,15	-10656,97
EP_HU	HUELVA	12871,88	-12418,32	14475,24	-15992,65	12436,18	-12406,76	14684,64	-15763,95
EP_JA	JAÉN	33800,00	-16175,12	35752,84	-19917,27	33106,44	-16138,90	36150,38	-19679,91
EP_MA	MÁLAGA	12840,69	-11270,95	14528,63	-15190,51	12361,57	-11246,51	14778,98	-14951,39
EP_SE	SEVILLA	17258,84	-19829,50	19551,78	-23935,28	16767,81	-19976,92	19831,01	-23621,74

Tabla 6.7. Resumen de la demanda máxima de energía por capitales, en función de su orientación

						DEMANDA (Málaga, Oeste)				
	Componentes					Calefacción		Refrigeración		Combinada
	CERRAMIENTO	n50	Rec.Calor	MARCO	VIDRIO	kWh/m2 año	% Reducción	kWh/m2 año	% Reducción	% Reducción
A0	**C1**	**5**	**-**	**AL sin rpt**	**4mm**	**14,53**	**-**	**-15,19**	**-**	**-**
A1	C1.1	5	-	AL sin rpt	4mm	**9,93**	31,63	**-14,09**	7,21	**19,15**
A2	C1.2	5	-	AL sin rpt	4mm	**9,04**	37,75	**-13,91**	8,42	**22,76**
A4	C1.1	3	-	AL sin rpt	4mm	**8,60**	40,79	**-13,92**	8,36	**24,21**
A5	C1.2	3	-	AL sin rpt	4mm	**7,58**	47,80	**-13,75**	9,48	**28,21**
A6	C1.3	3	-	AL sin rpt	4mm	**7,14**	50,83	**-13,65**	10,17	**30,05**
A8	C1	3	-	AL sin rpt	4mm	**13,12**	9,70	**-14,97**	1,47	**5,49**
A9	C1	5	-	Uf = 2,4	Ug = 1	**11,19**	23,01	**-12,40**	18,40	**20,65**
A10	C1	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1	**9,80**	32,52	**-12,24**	19,40	**25,81**
A11	C1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1	**9,71**	33,17	**-12,25**	19,38	**26,12**
A12	C1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	**9,89**	31,91	**-11,01**	27,49	**29,65**
A13	C1	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1	**8,45**	41,81	**-12,09**	20,42	**30,88**
A14	C1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1	**8,36**	42,45	**-12,10**	20,35	**31,15**
A15	C1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	**9,89**	31,91	**-11,01**	27,49	**29,65**
A16	C1.1	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1	**5,09**	64,95	**-10,92**	28,09	**46,11**
A17	C1.1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1	**5,00**	65,58	**-10,93**	28,06	**46,40**
A18	C1.1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	**5,16**	64,50	**-9,49**	37,53	**50,71**
A19	C1.1	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1	**3,81**	73,75	**-10,80**	28,87	**50,81**
A20	C1.1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1	**3,72**	74,37	**-10,82**	28,79	**51,07**
A21	C1.1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	**3,86**	73,43	**-9,37**	38,33	**55,49**
A22	C1.2	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1	**4,20**	71,12	**-10,68**	29,72	**49,96**
A23	C1.2	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1	**4,11**	71,74	**-10,69**	29,65	**50,23**
A24	C1.2	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	**4,25**	70,73	**-9,19**	39,48	**54,76**
A25	C1.2	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1	**2,94**	79,75	**-10,59**	30,29	**54,47**
A26	C1.2	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1	**2,85**	80,36	**-10,60**	30,24	**54,74**
A27	C1.2	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	**2,98**	79,48	**-9,08**	40,24	**59,42**
A28	C1.3	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1	**3,75**	74,17	**-10,54**	30,59	**51,89**
A29	C1.3	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1	**3,66**	74,79	**-10,56**	30,50	**52,15**
A30	C1.3	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	**3,80**	73,83	**-9,03**	40,55	**56,82**
A31	C1.3	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1	**2,51**	82,72	**-10,46**	31,12	**56,34**
A32	C1.3	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1	**2,42**	83,32	**-10,47**	31,06	**56,61**
A33	C1.3	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	**2,54**	82,50	**-8,91**	41,33	**61,45**

Tabla 6.8. Resumen de resultados de actuaciones de rehabilitación ensayadas en Málaga, orientación Oeste

aquellas combinaciones susceptibles de un ahorro mayor del 20% con respecto al estado previo a la rehabilitación.

A modo de ejemplo se incluye aquí la tabla 6.8, que corresponde al caso de la ciudad de Málaga (orientación Oeste), donde en todas las actuaciones ensayadas, salvo para la actuación A1 (consistente en instalar un SATE de 5 cm sin mejorar carpinterías ni la estanqueidad al aire de la vivienda) y la A8 (consistente únicamente en mejorar levemente la estanqueidad al aire de la vivienda) obtenemos valores de reducción de la demanda por encima del 20%. En concreto del 24,21% para la actuación A4 seleccionada.

6.2.3.5 Análisis del presupuesto por actuación

Cada una de las actuaciones propuestas ha sido medida y valorada pormenorizadamente utilizando el software específico de mediciones para edificación *Presto*^{TM}. Uno de los mayores problemas con los que nos hemos encontrado es que la Junta de Andalucía no tiene creado precios oficiales para este tipo de actuaciones, por lo que los precios unitarios utilizados han sido el resultado de combinar la base de precios oficial de la Junta de Andalucía (cuando ha sido posible), con la creación de precios específicos de rehabilitación, resultado de nuestra

	CERRAMIENTO	n50	Rec.Calor	MARCO	VIDRIO	P.E.M (€)
A0	C1	5	-	AL sin rpt	4mm	-
A1	C1.1	5	-	AL sin rpt	4mm	1693,11
A2	C1.2	5	-	AL sin rpt	4mm	1909,89
A3	C1.4	5	-	AL sin rpt	4mm	841,81
A4	C1.1	3	-	AL sin rpt	4mm	1730,71
A5	C1.2	3	-	AL sin rpt	4mm	1947,49
A6	C1.3	3	-	AL sin rpt	4mm	2202,98
A7	C1.4	3	-	AL sin rpt	4mm	1632,14
A8	C1	3	-	AL sin rpt	4mm	992,54
A9	C1	5	-	Uf = 2,4	Ug = 1	4399,85
A10	C1	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1	4437,45
A11	C1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1	4577,12
A12	C1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	4711,12
A13	C1	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1	4457,79
A14	C1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1	4597,46
A15	C1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	4731,46
A16	C1.1	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1	5295,89
A17	C1.1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1	5435,56
A18	C1.1	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	5569,56
A19	C1.1	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1	5316,23
A20	C1.1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1	5455,90
A21	C1.1	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	5585,90

	CERRAMIENTO	n50	Rec.Calor	MARCO	VIDRIO	P.E.M (€)
A22	C1.2	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1	5512,67
A23	C1.2	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1	5652,34
A24	C1.2	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	5786,34
A25	C1.2	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1	5533,01
A26	C1.2	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1	5672,68
A27	C1.2	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	5806,68
A28	C1.3	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1	5768,16
A29	C1.3	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1	5907,83
A30	C1.3	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	6041,83
A31	C1.3	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1	5788,50
A32	C1.3	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1	5928,17
A33	C1.3	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	6062,17
A34	C1.4	3	-	Uf = 2,4	Ug = 1	4988,60
A35	C1.4	3	-	Uf = 1,4	Ug = 1	5128,27
A36	C1.4	3	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	5262,27
A37	C1.4	1	-	Uf = 2,4	Ug = 1	5008,54
A38	C1.4	1	-	Uf = 1,4	Ug = 1	5148,61
A39	C1.4	1	-	Uf = 1,4	Ug = 0,6	5282,61

Tabla 6.9. Resumen los presupuestos de ejecución material de los diferentes tipos de actuaciones

experiencia en obras de rehabilitación anteriores.
En la tabla 6.9 se resumen los presupuestos de ejecución material de los diferentes tipos de actuaciones para la vivienda tipo ya comentada. Éstos varían desde los 841,81 € para la actuación tipo A3 (rehabilitación consistente en aplicar únicamente pintura termoreflexiva al cerramiento exterior), a los 6.062,17 € para la actuación tipo A33 (rehabilitación consistente en la combinación de SATE de 15 cm con marcos y vidrios de la más alta calidad, combinado con un alto grado de estanqueidad al aire de la envolvente).

En el Anexo 6.3.5 *Análisis del presupuesto por actuación* se incluyen un total de 78 ficheros pdf específicos correspondientes a la Medición y el Resumen del presupuesto de cada una de las 39 actuaciones valoradas en la tabla 6.9 Igualmente se incorpora la citada tabla en un formato más completo y legible.

6.2.3.6 Resultados por capitales

En este apartado se incluyen fichas resumen específicas de los resultados por tipos en cada una de las capitales. En la figura 6.9 podemos observar dos ejemplos de resultados correspondientes a la actuación tipo A15 en Jaén y a la actuación tipo A31 en Córdoba. La ficha resumen incluye resultados de enfriamiento sensible, enfriamiento total y calentamiento de zonas expresados en Wh/m², así como valores de temperaturas, ganancias de calor y consumo energético anuales.
Existen un total de 264 fichas resumen correspondientes a cada una de las simulaciones de demanda energética realizada. El Anexo 6.3.6 *Resultados por capitales* incluye la totalidad de las fichas resumen indicadas.

6.2.3.7 Resultados por tipos

En este apartado se ha estudiado el comportamiento energético de las 19 viviendas tipo seleccionadas en su estado original y reformado, aplicando el criterio de rehabilitación tipo. Para las viviendas situadas en calle tres Carabelas 4ºE y 4ºF, además se ha realizado una simulación energética más correspondiente al tercer estado, una vez finalizada la obra de rehabilitación realizada.

En la tabla 6.10 se resumen los tipos específicos de cerramientos, medianeras,

Vivienda		Componentes				
ID.	Dirección	Cerramiento	Medianeras	Particiones	Carpinterías ext.	Vidrios
V1	PASAJE EL GRECO	C1	M1	P1	Aluminio	4 mm
V2	RUIZ DE ALARCÓN	C1	M1	P1	Aluminio	4 mm
V3	PLAZA ORQUÍDEA	C8	M3	P2	Aluminio	4 mm
V4	AVD. DIEGO MORÓN	C1	M1	P1	Aluminio	4 mm
V5	CALLE VILLABLANCA	C2	M1	P1	Aluminio	4 mm
V6	CRISTO DEL AMOR	C1	M1, M2	P1	Aluminio	4 mm
V7	PLAZA COLUMPIOS	C3	M1	P1	Aluminio	4 mm
V8	CALLE ARGANTONIO	C4	M3	P1	Aluminio	4 mm
V9	GLORIETA FORJADORES	C5	M3	P2	Aluminio	4 mm
V10	VIRGEN CHIQUITA	C5	M4	P2	Aluminio	4 mm
V11	FERNÁNDEZ ALVARADO	C4	M1	P1	Aluminio	4 mm
V12	CALLE HONDURAS	C6	M1	P1	Aluminio	4 mm
V13	CRISTO DEL AMOR 2	C3	M1	P1	Aluminio	4 mm
V14	TRES CARABELAS 4ºF	C7	M5	P2	Aluminio	4 mm
V15	TRES CARABELAS 4ºE	C7	M5	P2	Aluminio	4 mm
V16	FEDERICO MAYO	C3	M1	P2	Aluminio	4 mm
V17	CALLE VENEZUELA	C3	M1	P2	Aluminio	4 mm
V18	TENIENTE DE NAVÍO	C3	M1	P2	Aluminio	4 mm
V19	CALLE RÍO TURIA	C3	M1	P2	Aluminio	4 mm

Tabla 6.10. Resumen de tipos específicos de elementos constructivos

Vivienda		Simulaciones		
ID.	Dirección	Previo	SATE + Carpinterias + Estanqueidad	Estado Final Obra
V1	PASAJE EL GRECO	S1	S1.ref	-
V2	RUIZ DE ALARCÓN	S2	S2.ref	-
V3	PLAZA ORQUÍDEA	S3	S3.ref	-
V4	AVD. DIEGO MORÓN	S4	S4.ref	-
V5	CALLE VILLABLANCA	S5	S5.ref	-
V6	CRISTO DEL AMOR	S6	S6.ref	-
V7	PLAZA COLUMPIOS	S7	S7.ref	-
V8	CALLE ARGANTONIO	S8	S8.ref	-
V9	GLORIETA FORJADORES	S9	S9.ref	-
V10	VIRGEN CHIQUITA	S10	S10.ref	-
V11	FERNÁNDEZ ALVARADO	S11	S11.ref	-
V12	CALLE HONDURAS	S12	S12.ref	-
V13	CRISTO DEL AMOR 2	S13	S13.ref	-
V14	TRES CARABELAS 4ºF	S14	S14.ref	S14.ref.obra
V15	TRES CARABELAS 4ºE	S15	S15.ref	S15.ref.obra
V16	FEDERICO MAYO	S16	S16.ref	-
V17	CALLE VENEZUELA	S17	S17.ref	-
V18	TENIENTE DE NAVÍO	S18	S18.ref	-
V19	CALLE RÍO TURIA	S19	S19.ref	-

Tabla 6.11. Resumen de acrónimos del estado previo y posterior

particiones, marcos y vidrios en el estado inicial para cada una de las viviendas tipo.
En la tabla 6.11 se especifican los acrónimos del estado previo y posterior para identificar las fichas de resumen de resultados de la rehabilitación energética. En el Anexo 6.3.7 *Resultados por tipo* se incluyen, para cada tipo de vivienda, un archivo pdf resumen de la simulación energética realizada en estado previo y posterior a la reforma, así como un tercer archivo comparativo de los resultados. En total 61 archivos.

6.2.4 Actuaciones de rehabilitación energética

En este epígrafe se incluyen todas las actuaciones realizadas en las viviendas que se han rehabilitado. Éstas han sido de dos tipos:

1. Actuaciones bajo el concepto de viviendas pasiva o de consumo de energía mínimo (MEB), lo cual conlleva la implementación de soluciones no basadas en sistemas sino en actuaciones en la envolvente de las viviendas: SATE, carpinterías, puentes térmicos, etc.

2. Actuaciones sobre sistemas propios de la vivienda o añadidos a ella. En cuanto a los propios, se debe fundamentalmente a la configuración de la instalación eléctrica, el agua caliente sanitaria (ACS) y la renovación del aire interior de la vivienda. Se consideran

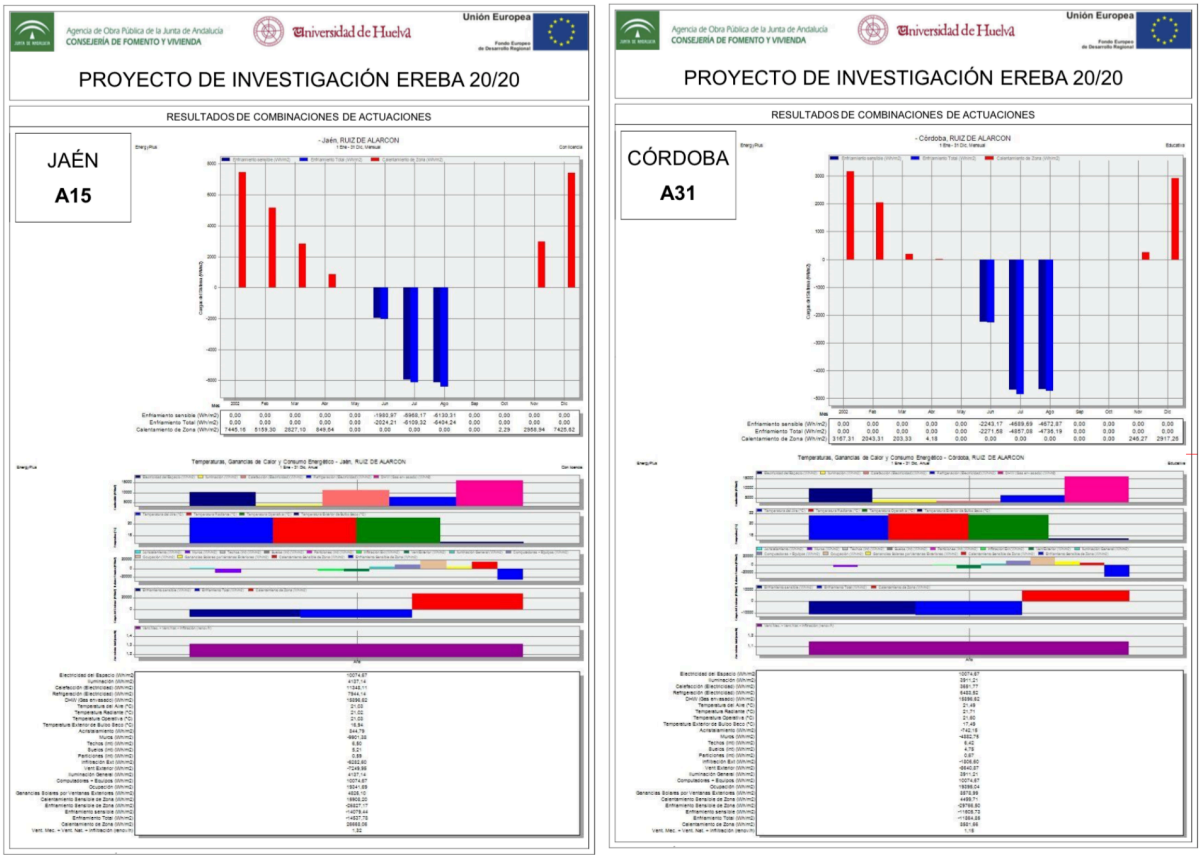


Figura 6.9. Ejemplos de resultados correspondientes a la actuación tipo A15 en Jaén y a la actuación tipo A31 en Córdoba

añadidos los sistemas de producción de energía eléctrica de forma renovable: fotovoltaica y eólica.

El epígrafe se estructura en base a la división anterior, distinguiendo cada una de las actuaciones y sistemas.

6.2.4.1 Rehabilitación energética de la envolvente



Figura 6.10. Detalle de ejecución del SATE aplicado

La actuación de rehabilitación energética de la envolvente en las viviendas ubicadas en calle Tres Carabelas 4ºE y 4ºF, ha consistido en la aplicación de un sistema de aislamiento térmico por el exterior (SATE) de lana mineral (LM) de 10 cm de espesor (Ver figura 6.10). El sistema elegido es el denominado *Isofex* de la marca comercial *Isover*^{TM}, que constituye la principal referencia del sector en este tipo de soluciones de aislamientos térmicos con el exterior.



Figura 6.11. Detalle de carpinterías instaladas

Para la solución de huecos de estas viviendas se ha instalado un sistema de carpinterías de PVC practicables de siete cámaras (valor de Uf = 1,1 W/m^{2}K) y espesor total de 82 mm que alojan vidrios de doble cámara bajo emisiva inyectada con gas argón al 90% de espesor 6/15/6/15/6 (valor de Ug = 0,6 W/m^{2}K) (Ver figura 6.11). Por causa de fuerza mayor que tiene que ver con no perjudicar la funcionalidad del espacio, en las cocinas se instalaron carpinterías de PVC correderas de cinco cámaras (valor de Uf = 2,4 W/m^{2}K) y espesor total 72 mm que alojan vidrios de cámara bajo emisiva inyectada con gas argón al 90% de espesor 6/16/6 (valor de Ug = 1 W/m^{2}K). El puente térmico entre el cerramiento existente y el marco de la carpintería (instalado en el mismo plano que el aislamiento SATE, por tanto a cara exterior de fachada) se resuelve mediante sistema SWS de la marca comercial *Soudal*^{TM}, consistente en junta expansiva semipermeable -continua en todo el perímetro del marco- sellado con espuma de poliuretano flexible y rejuntado con silicona neutra de alta durabilidad (figura 6.12).



Figura 6.12. Detalle de sistema de sellado de carpinterías

Para fijar mecánicamente la pesada carpintería a la hoja de cerramiento original de la fachada, en estado de estabilidad mecánica indeterminada, y mantenerla volada con respecto a la misma (consiguiendo una continuidad completa de la envolvente térmica, con ausencia absoluta de puentes térmicos en el encuentro con los huecos de fachada) se ha optado por instalar cajones completos formados con paneles fenólicos en cada uno de los huecos. Finalmente, se han tratado convenientemente las medianeras verticales de la vivienda por el interior (ya que éstas resultan inaccesibles por el exterior) mediante trasdosado de tabique de doble placa a una cara de yeso laminado autoportante con aislamiento continuo (no entre perfiles), de lana mineral de 4 cm de espesor (figura 6.13).

En la vivienda 4ºE de la calle Tres Carabelas, además de lo anterior, se ha actuado sobre el



Figura 6.13. Detalle de trasdosado de medianeras

techo y sobre el suelo de la vivienda. En concreto, se ha revestido el techo con panel aislante continuo de lana mineral de 4 cm de espesor, sujeto mediante perfilería de omegas de acero galvanizado de bajo perfil (2,5 cm) y revestida de placa simple de yeso laminado. La solería de tarima flotante de la vivienda 4ºE se ha levantado y vuelto a montar, para colocar bajo ella lámina aislante de bajo perfil (8 mm),



Figura 6.14. Material y maquinaria sistema *Insuver*

compuesta de polietileno expandido, lámina termoreflexiva de aluminio y lámina antimpacto de burbujas de aire.

En la vivienda de la calle de Honduras nº 31, la actuación de rehabilitación energética de la envolvente ha consistido en el insuflado de la cámara de aire interior del cerramiento con fibras de lana mineral, según el sistema *Insuver* de la marca comercial *Isover*^{TM}. Posteriormente se ha aplicado sistema SATE de bajo coste consistente en pintura exterior termoreflexiva (figuras 6.14 y 6.15).

En la vivienda situada en la plaza de los Columpios 2ºD, la actuación de rehabilitación



Figura 6.15. Ejecución del sistema *Insuver*

energética de la envolvente ha consistido en aplicación de sistema SATE de bajo coste con pintura exterior termoreflexiva (figura 6.16).

En el Anexo 6.4.1 *Rehabilitación energética de la envolvente* están incluidos las fichas técnicas específicas de los materiales citados, el proyecto específico de rehabilitación energética redactado, así como gran cantidad de fotografías correspondientes a la ejecución de obra de este apartado.



Figura 6.16. Ejecución del sistema SATE de bajo coste con pintura termoreflexiva

6.2.4.2 Configuración de instalación eléctrica

La instalación eléctrica de la vivienda ubicada en calle Tres Carabelas 4ºE ha sido desarrollada por completo como parte del proceso de rehabilitación de la misma. En ella se han realizado 14 circuitos finales, con objeto de poder medir los consumos de interés de forma individualizada. El esquema se muestra en la figura 6.17. En él se aprecian dos líneas cuya medida de consumo no están monitorizadas. La denominada *instrumentación,* porque su consumo es muy bajo (menor de 300 mA), ya que alimenta la electrónica de instrumentación desarrollada; y la denominada *automatización*, porque es una línea que se ha dejado instalada en la casa por si algún día los inquilinos desean instalar algún sistema domótico. Es destacable la línea denominada *brasero*, la cual pretende satisfacer una

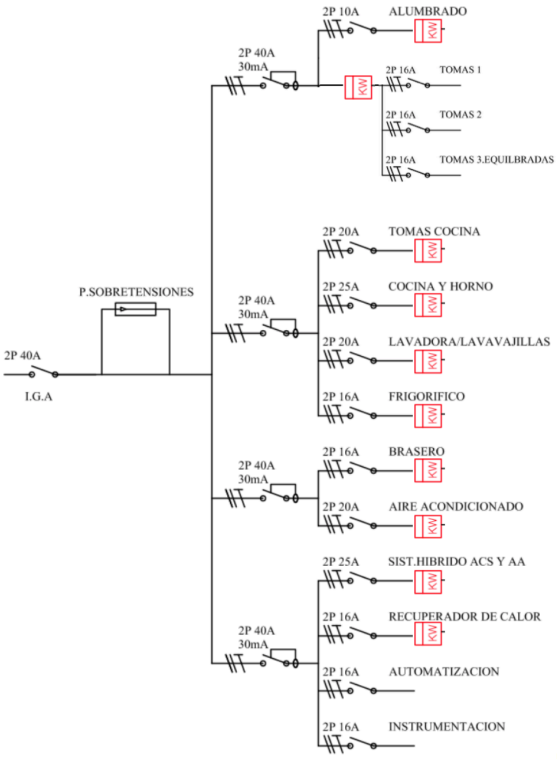


Figura 6.17. Esquema de la instalación eléctrica de la vivienda 4ºE

costumbre muy arraigada como la de utilizar un brasero eléctrico en una *mesa de camilla*, en las épocas de mayor frío. Realmente se trata de una costumbre más que de una necesidad, una vez que la casa ha sido rehabilitada. Sin embargo, con objeto de medir su incidencia en el consumo, se ha considerado una línea

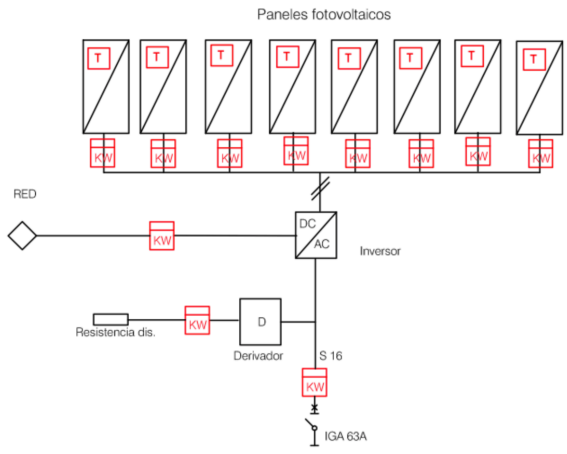


Figura 6.18. Esquema de la instalación de renovables de la vivienda 4ºE

específica para esta utilidad. El esquema de instalación de renovables instalado en la vivienda 4ºE es el que se indica en la figura 6.18.

Respecto a la instalación eléctrica de la vivienda ubicada en calle Tres Carabelas 4ºF, su configuración es la inicial ya que no se ha hecho

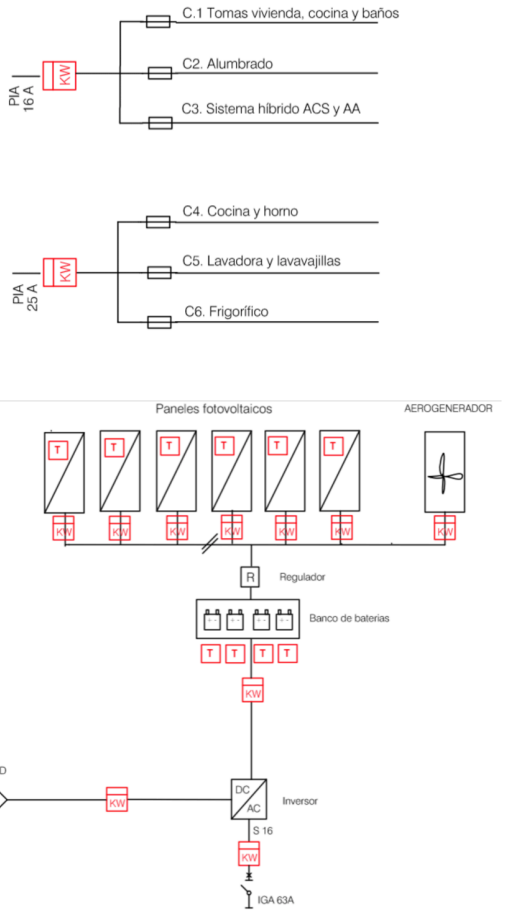


Figura 6.19. Esquema de la instalación eléctrica y de renovables de la vivienda 4ºF

intervención alguna al respecto, salvo colocar medidores de consumo en cabecera y montar la instalación de energías renovables que se muestra en la figura 6.19.

6.2.4.3 Sistemas integrados de energias renovables

Si bien la solución desarrollada para las viviendas 4ºE y 4ºF en calle Tres Carabelas es diferente, en ambas se cumple una premisa



Figura 6.20. Imagen de la instalación de renovables de la vivienda 4ºE



Figura 6.21. Imagen de la instalación de renovables de la vivienda 4ºE

muy importante para no hacer uso de la red no perteneciente al propietario: todo el trasiego de energía eléctrica se realiza en la red propietaria del usuario, y además se garantiza que el sistema de energía renovable no vierte, en ninguna condición de funcionamiento, energía eléctrica hacia fuera de la vivienda.

En ambas viviendas, la instalación desarrollada se encuentra clasificada de acuerdo a la ICT-BT-40 como instalaciones generadoras de baja tensión.

La vivienda 4ºE es alimentada con una solución que garantiza que conecta a la vivienda toda la potencia de energía renovable disponible. Si sobra potencia, ésta se emplea en calentar una resistencia (podría tener otro uso en un futuro), y si falta, ésta es tomada de la red. El conjunto de ocho paneles fotovoltaicos se conecta a un inversor de aplicación específica para este uso cuya salida es de 230 AC monofásico (figura 6.20). Dicho inversor tiene también una entrada de 230 AC monofásico procedente de la red. El inversor regula que la componente de energía procedente de la instalación fotovoltaica más la de la red satisfaga en todo momento la demanda de la vivienda. En la figura 6.17 se muestra el esquema unifilar de la instalación.

La instalación fotovoltaica es fija, ubicada en cubierta, tiene una potencia nominal de 2.000 Wp (8 paneles de 250 Wp) y consta de los elementos siguientes (ver figuras 6.18 y 6.21).

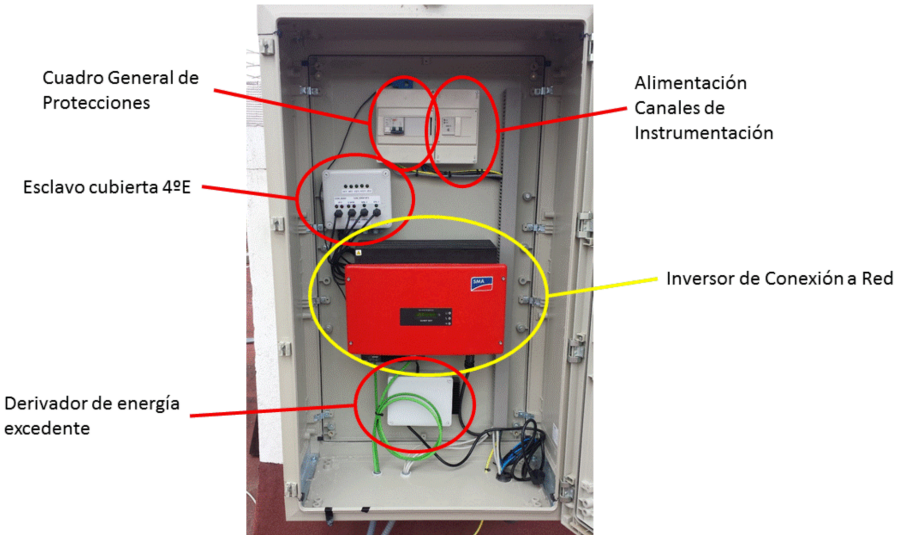


Figura 6.22. Detalle del armario de conexiones de la instalación fotovoltaica de la vivienda 4ºE

- Módulos fotovoltaicos.
- Estructura.
- Inversor.
- Elementos de protección, maniobra y medida.
- Cableado y línea general.
- Derivador.
- Sistema de monitorización y control.

En las figuras 6.20 y 6.21 se muestran fotografías del sistema fotovoltaico montado en cubierta para la vivienda 4ºE. En la figura 6.22 se muestra el detalle del armario de conexiones de la instalación fotovoltaica, en el que se puede apreciar el inversor de conexión a red, el derivador de energía excedente, para no verter nada generado a la red eléctrica, así como los datos de temperatura y producción generada, los cuales son enviados al *master* situado en la vivienda 4ºE (figura 6.23).

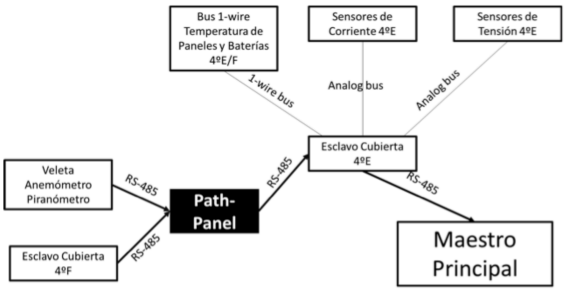


Figura 6.23. Esquema de comunicación del master situado en la vivienda 4ºE

Para la vivienda 4ºF, se emplea una solución diferente, consistente en que la vivienda está conectada al sistema de energía renovable siempre que éste pueda satisfacer su demanda. Ahora, a diferencia del caso anterior, la energía eléctrica procede de un banco de almacenamiento a baterías, con lo cual el suministro es bajo demanda hasta alcanzar la potencia máxima. Cuando la demanda supera la potencia disponible en el sistema de energía renovable, se produce una conmutación automática para que la vivienda pase a estar alimentada desde la red eléctrica. Esto quiere decir que la vivienda, a diferencia del caso anterior, está alimentada bien de su propia red de energía renovable (isla) o de la red de distribución, pero nunca de ambas. El esquema de la instalación de renovables se muestra en la figura 6.20. En la figura 6.24 se puede apreciar



Figura 6.24. Aerogenerador instalado en la cubierta de la vivienda 4ºF



Figura 6.25. Sistema de seis paneles FV instalado en la cubierta de la vivienda 4ºF

el aerogenerador, en la figura 6.25 el conjunto de seis paneles y en la figura 6.26 el banco de baterías. Éste está ubicado en el armario que se ve debajo de los paneles en la figura 6.25 (esquina inferior derecha de la fotografía). La figura 6.27 muestra el armario donde se encuentran ubicados el inversor y los sistemas del aerogenerador.

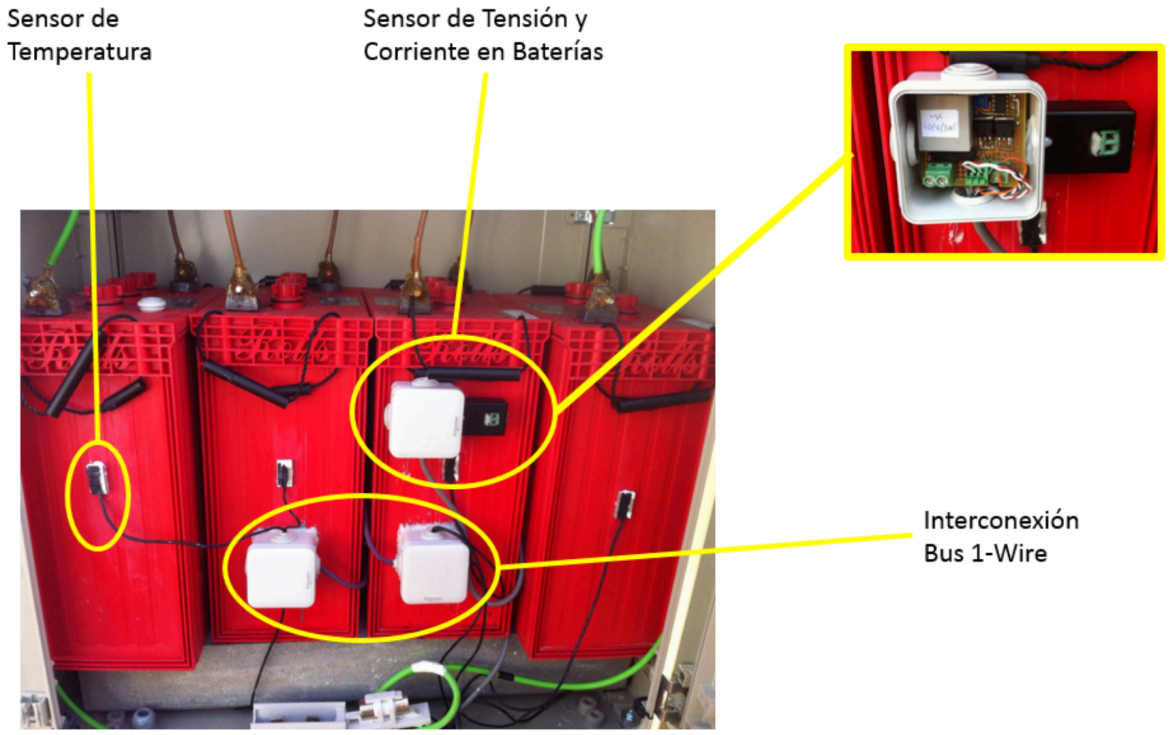


Figura 6.26. Banco de baterías instalado en la vivienda 4ºF

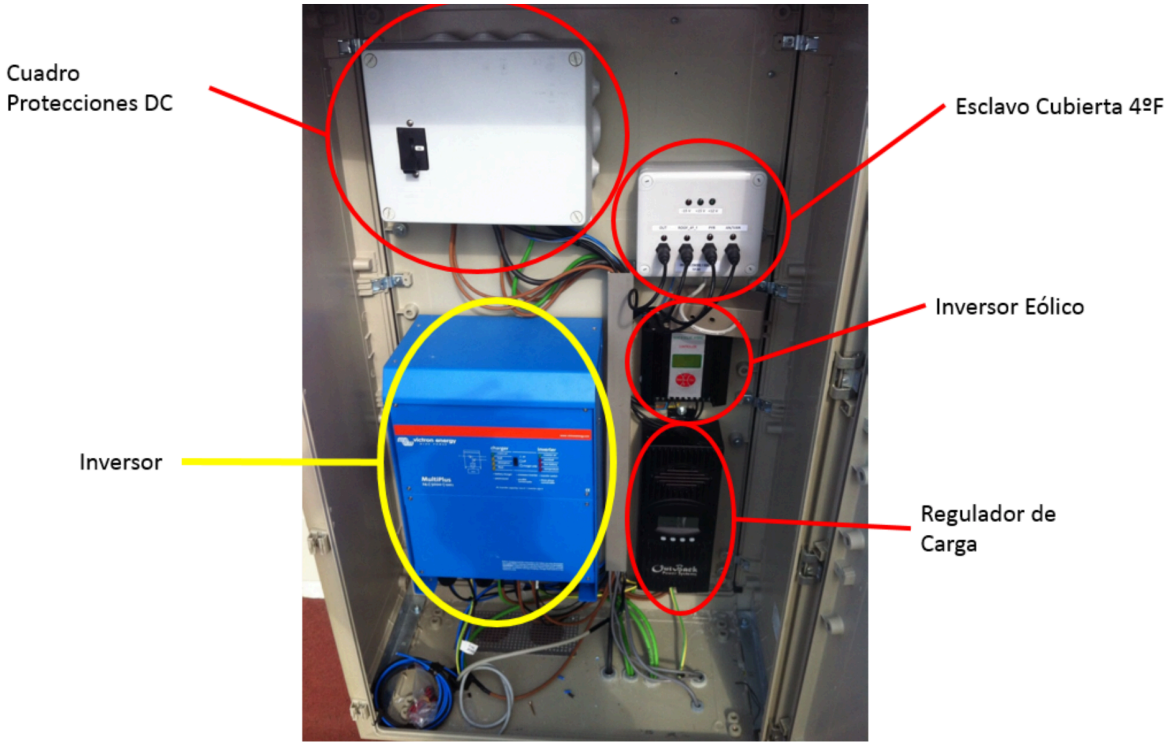


Figura 6.27. Detalle del armario de conexiones de la instalación fotovoltaica y eólica de la vivienda 4ºF

6.2.4.4 Sistemas activos de alta eficiencia

Distinguimos dos tipos de sistemas activos de alta eficiencia implementados en este proyecto:

- Generación de ACS a base de captadores solares con apoyo de aerotermo.
- Renovación del aire interior de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia.



Figura 6.28. Sistema de captadores solares térmicos para ACS

En lo que respecta al ACS, en un montaje habitual, se enseria como apoyo a los captadores solares (figura 6.28) un termo/caldera de gas u otro combustible de respuesta rápida. Este sistema de respuesta rápida ha de ser modulante en temperatura, de modo que cuando la temperatura del agua proveniente de los captadores baje de una temperatura de consigna, el termo/caldera compensa la temperatura para adecuar el agua de entrada a la vivienda. En nuestro caso, con objeto de conseguir mayor eficiencia se ha utilizado un aerotermo (figura 6.29), que no es un sistema de respuesta rápida, sino más bien un elemento acumulador de ACS. Consecuentemente, la solución anterior no es válida para este sistema.



Figuras 6.29 y 6.30. Aerotermo instalado y detalle de válvula

Por ello, se ha colocado una válvula de tres vías tarada en temperatura con dos entradas (figura 6.30), una proveniente de los captadores solares y otra del aerotermo, lo cual hace que el agua de los captadores solares -sin pasar por el aerotermo- quede compensada con la procedente de éste. De esta forma, captadores y aerotermo trabajan de forma independiente y ambos cuentan también con tomas de agua fría independiente. Eso permite que los dos sistemas tengan su dinámica de funcionamiento completamente diferente, de modo que su rendimiento es máximo.



Figura 6.31. Sistema de ventilación forzada de doble flujo de alta eficiencia. Máquina y detalle de salida de tubos

En lo que respecta a la renovación del aire interior de la vivienda, la solución más habitual que recoge el Código Técnico de la Edificación aplicable a viviendas (CTE-DB-HS), consiste en la ventilación mixta mediante extractor forzado en núcleos húmedos (cocinas y aseos) con aberturas de admisión en estancias vivideras (salón-comedor y habitaciones) y aberturas de paso en puertas que aseguren el trasiego de aire de estancias vivideras a núcleos húmedos. La solución que se ha implementado consiste en instalar un sistema completo de ventilación forzada de doble flujo de aire por conducto, con recuperación de calor de alta eficiencia. El sistema principal (figura 6.31) consta de un ventilador con dos tomas y dos expulsiones de



Figura 6.32 y 6.33. Sistema de ventilación forzada de doble flujo de alta eficiencia. Conductos y rejilla de salida

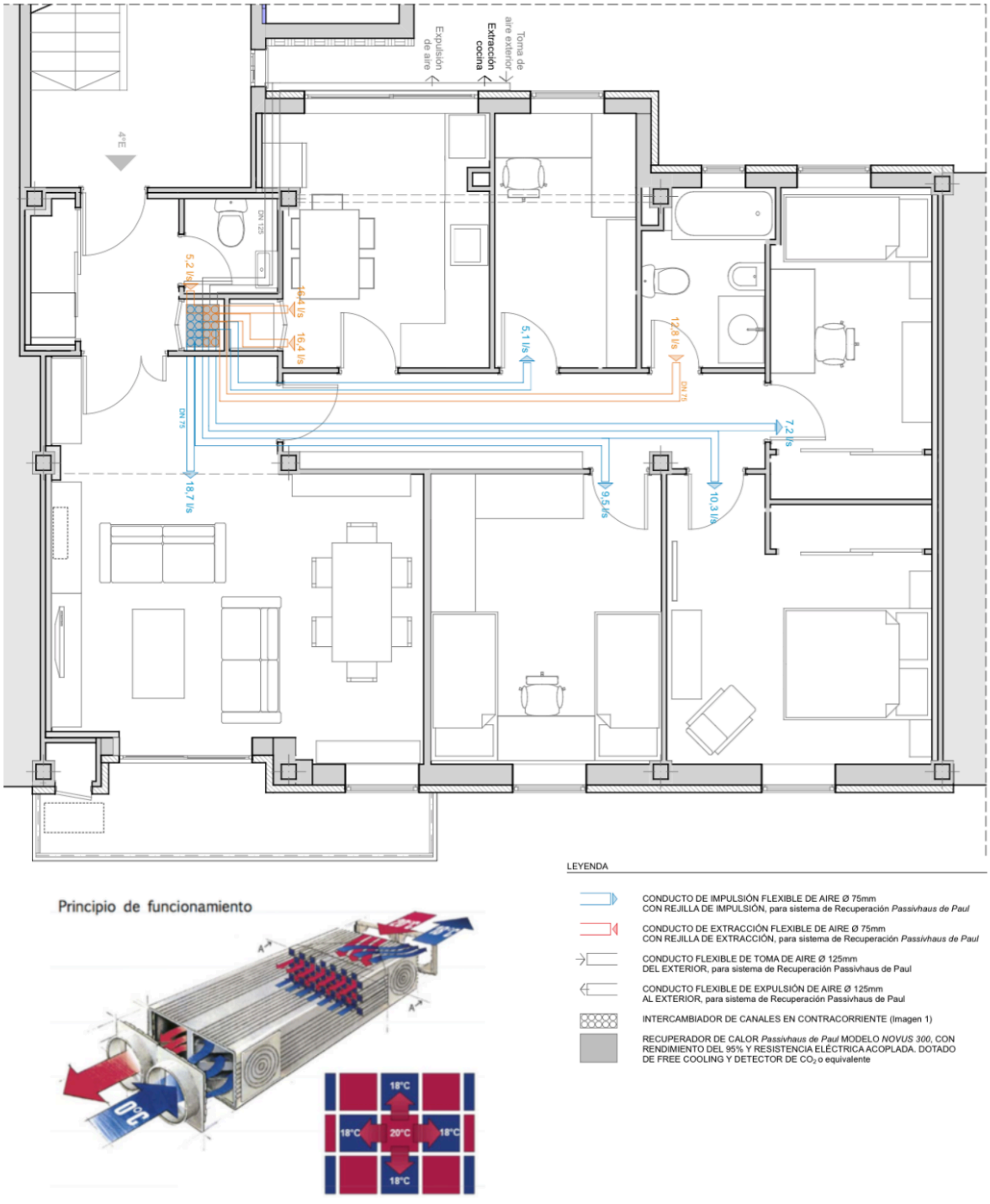


Figura 6.34. Esquema general de la instalación de ventilación de doble flujo con recuperación de calor

aire exterior. El sistema recupera el calor del aire viciado interior de la vivienda antes de expulsarlo al exterior, consiguiendo de esa manera que el aire fresco proveniente del exterior aproveche la energía calorífica antes de ser impulsado al interior, con un rendimiento del 93%. Los conductos por donde se mueve el aire de ventilación (figura 6.32) se disponen por el falso techo del pasillo, y acometen a las distintas estancias por rejillas de aluminio estándar (figura 6.33). El esquema general de la instalación de ventilación se encuentra detallado en la figura 6.34.

6.2.5 Instrumentación específica desarrollada

Este apartado del proyecto ha sido dividido en dos partes bien diferenciadas. Una primera que hace referencia al *hardware* desarrollado y otra al *software* y el procesamiento de los datos obtenidos. La primera parte hace referencia tanto a la electrónica como al software de monitorización y control de la misma, esto es, instrumentos virtuales que desde una consola de ordenador permiten la monitorización y control de toda la instalación en tiempo real. La segunda parte engloba el tratamiento de los datos obtenidos, de modo que el usuario tenga herramientas de interpretación sobre los mismos: bases de datos, curvas, gráficas, operaciones, etc.

Todo el desarrollo de instrumentación está basado en un concepto en el que incide mucho este proyecto, y se refiere al de tener medidas que permitan tomar decisiones sobre las actuaciones de rehabilitación. Así, se ha desarrollado instrumentación para análisis de las viviendas previo a ser rehabilitadas, e instrumentación para medir el alcance de resultados de la rehabilitación implementada.

Cuando se afronta la rehabilitación de viviendas y se quieren instrumentar las mismas para conocer con precisión el antes y el después de la rehabilitación, es fundamental tener en cuenta que, en general, son viviendas que antes y después de la rehabilitación están habitadas. Por tanto, todas las actuaciones tienen que ser llevadas a cabo con el menor impacto para los inquilinos, ya que en caso contrario, la participación de los mismos, o al menos el no rechazo, no queda garantizado. En este sentido, si bien los inquilinos pueden estar dispuestos a soportar una instrumentación previa a la rehabilitación con el convencimiento de que la misma desaparecerá una vez tomadas las medidas, el grado de complacencia no será el mismo si se pretende que la vivienda quede instrumentada después de la rehabilitación, y dicha instrumentación esté continuamente generando problemas de confort en el hogar. Por tanto, si bien las medidas previas a la rehabilitación se han tomado con el convencimiento por parte de los inquilinos de que era una molestia pasajera, en el diseño del sistema final que, en tiempo real, está tomando medidas de la vivienda para tener datos del comportamiento de la rehabilitación realizada, se ha tenido sumo cuidado en que pasara desapercibido para sus habitantes.

6.2.5.1 Instrumentación desarrollada

Aquí se describe toda la instrumentación electrónica desarrollada para el proyecto y el software que la monitoriza y controla. Con carácter general se ha desarrollado una instrumentación alámbrica y otra inalámbrica, simplemente por el hecho de comprobar el funcionamiento de las mismas, aunque obviamente, cuando se analicen las conclusiones de lo realizado, se pondrán de manifiesto decisiones al respecto. En cualquier caso, dotar a una vivienda de instrumentación alámbrica implica que en la rehabilitación de la misma se tenga en cuenta la tirada de cables necesaria para que esto se pueda llevar a cabo, ya que debe ser permanente y, por supuesto, transparente para el usuario. Esto evidentemente supone un coste. La instrumentación inalámbrica, si bien tiene una

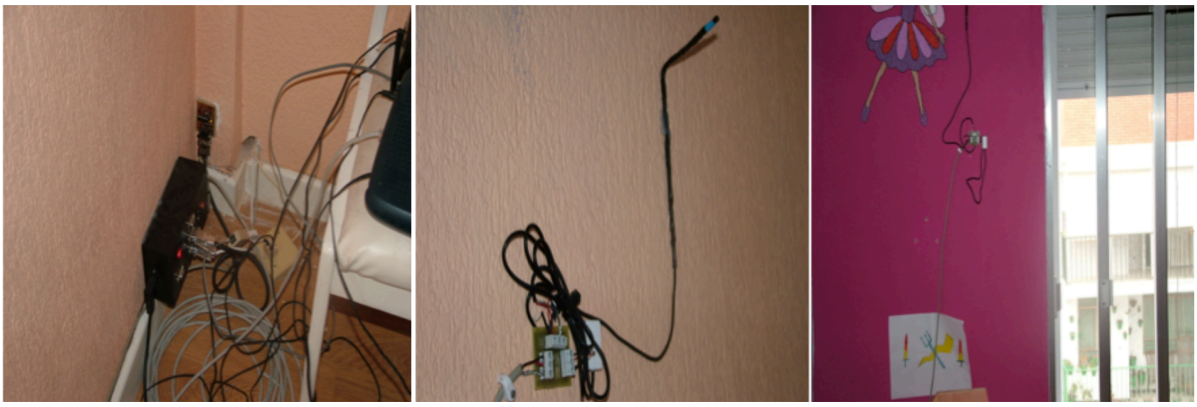


Figura 6.35. Instrumentación provisional de medida de temperatura y humedad en una de las habitaciones

complejidad añadida en tanto en cuanto ha de garantizarse el trasiego de señales independientemente de los obstáculos que de forma dinámica se generan en la vivienda (paso de personas, movimiento de mobiliario, etc.), presenta la ventaja de no requerir ningún tipo de obra y, además no ser permanente, con lo cual permite su extracción, además de su sustitución por versiones mejoradas. También se evitan los costes de tirada de cables, aunque los sistemas inalámbricos son más caros que los cableados.

En las viviendas ubicadas en calle Tres Carabelas 4ºE y F, se realizaron medidas interiores y exterior es de las variables de interés durante varios meses del año 2014. Estas medidas se llevaron a cabo antes de realizar ninguna actuación de rehabilitación sobre las viviendas, con objeto de permitir comparaciones con las medidas después de la rehabilitación. En la figura 6.35 se muestra a modo de ejemplo la medida de temperatura y humedad en una de las habitaciones de la vivienda mencionada. Nótese el grado de provisionalidad de la instrumentación implementada previa a la rehabilitación. Por supuesto, la casa al inquilino no se la puede dejar así después de la rehabilitación.

En concreto, en las viviendas 4ºF y 4ºE de la calle Tres Carabelas 5 de Huelva, se han realizado, previa a su rehabilitación, las medidas siguientes:

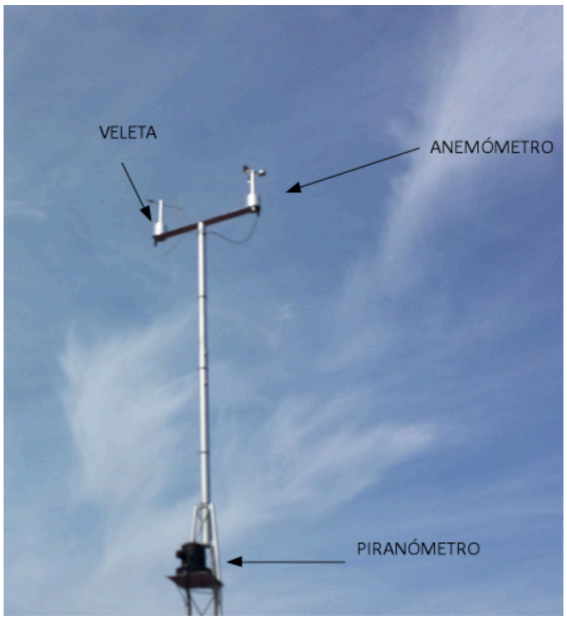


Figura 6.36. Sistema veleta, anemómetro, piranómetro montado en la cubierta

- Medidas de temperatura en habitaciones.
- Medidas de temperatura en el exterior de la vivienda.
- Medidas de humedad relativa en habitaciones.
- Medidas de humedad relativa en el exterior de la vivienda.
- Medidas de dirección y velocidad del viento.
- Medidas de irradiancia solar.

En la figura 6.36 se muestra el sistema veleta+anemómetro+piranómetro montado en la cubierta del bloque que acoge a las viviendas mencionadas, con objeto de, previo a su rehabilitación, llevar a cabo medidas de dirección y velocidad del viento, así como de irradiancia solar.

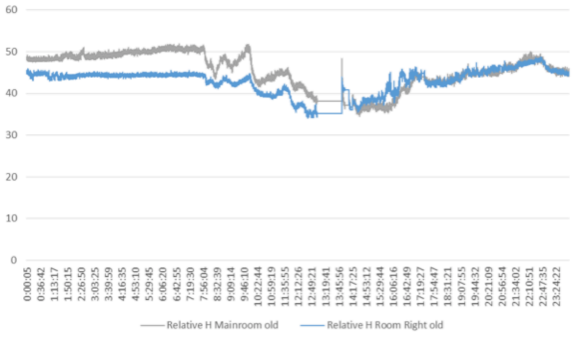


Figura 6.37. Datos de humedad relativa tomados en la vivienda 4ºE

En la figura 6.37 se muestra también como ejemplo los datos de humedad relativa tomados durante un día cualquiera de marzo de 2014 en la vivienda 4ºE.

Hubiera sido deseable disponer también de medidas de consumo eléctrico previa a la rehabilitación de las viviendas mencionadas, sin embargo, la configuración de la instalación eléctrica, muy antigua, impedía la selectorización por circuitos, con lo cual la única forma de medir el consumo eléctrico ha sido mediante medida total a través del recibo suministrado por la compañía distribuidora.

Una vez rehabilitadas las viviendas, éstas (4ºF y 4ºE de la calle Tres Carabelas 5 de Huelva), quedaron instrumentadas interiormente. En la figura 6.38 se muestra la sensorística instalada

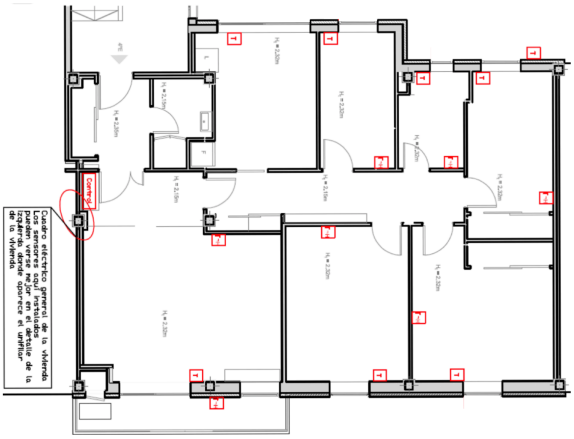


Figura 6.38. Sensorística instalada en la vivienda 4ºE

en la vivienda 4ºE, la cual está cableada a nivel de señales (se aprovechó el cambio de la instalación eléctrica para cablear la casa a nivel de señales). La vivienda consta de dos sensores de temperatura por estancia (a diferente altura para captar la estratificación); un sensor de humedad (la ubicación del sensor de humedad y del segundo de temperatura es la misma) por estancia. En la figura 6.39 se muestra el esquema unifilar de la sensorística montada en la vivienda 4ºE.

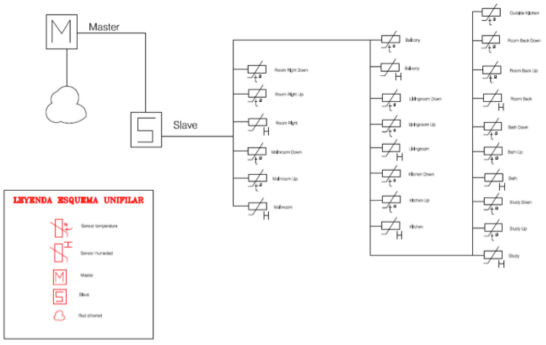


Figura 6.39. Esquema unifilar de la sensorística montada en la vivienda 4ºE

En la figura 6.17 se muestra el esquema eléctrico después de la rehabilitación de la vivienda 4ºE. En ella se han instalado sensores de tensión y corriente en cada circuito que permiten medir la potencia consumida en el tiempo (energía, kWh).

En la figura 6.40 se muestra la sensorística instalada en la vivienda 4ºF, la cual no está cableada, de modo que es inalámbrica. La

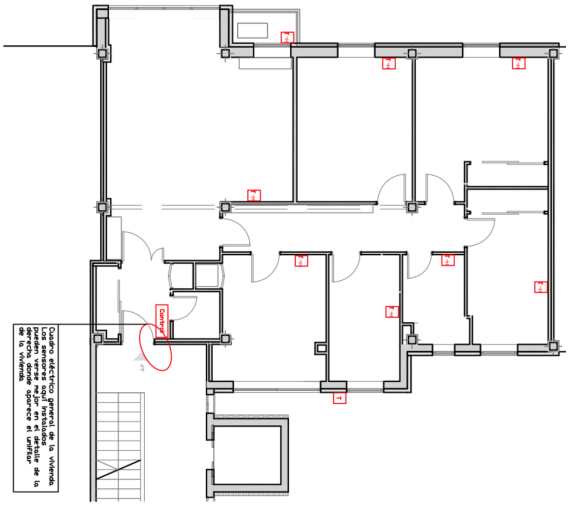


Figura 6.40. Sensorística instalada en la vivienda 4ºF

vivienda consta de un sensor de temperatura y humedad por estancia (ubicados en la misma posición). Debido al coste, no se ha considerado la instalación de un segundo sensor de temperatura a diferente altura. Además, hay que tener en cuenta que en esta vivienda no se ha cambiado la instalación eléctrica interna, con lo cual, si tenemos en cuenta que cada punto inalámbrico condena una toma de corriente en la estancia que se ubica, la instalación de un segundo punto de



Figura 6.41. Armario de comunicaciones instalado en la vivienda 4ºE



Figura 6.42. Instalación renovable de la vivienda 4ºE

medida de temperatura implicaría probablemente la condena de todas las tomas de corriente de las estancias consideradas. No obstante, y aunque el resultado pueda quedar menos estético, siempre queda la posibilidad de instalar doble o triples tomas en los enchufes.

El esquema unifilar de la sensorística de esta vivienda (figura 6.40) es análogo al mostrado en la figura 6.39, con la salvedad de que el número de sensores de temperatura es menor por las razones que ya se han explicado.

En la figura 6.19 se muestra el esquema unifilar de la instalación eléctrica de la vivienda 4ºF. Este esquema corresponde al original de la casa, ya que como se ha mencionado, no se ha cambiado. No obstante, en cabecera se han



Figura 6.43. Instalación renovable de la vivienda 4ºF (vista parcial)

instalado sensores de tensión y corriente que permiten medir la potencia consumida en el tiempo (energía, Kwh).

La centralización de las comunicaciones de las dos viviendas para su enlace a través de internet, con los laboratorios del Grupo de investigación, se realiza desde la vivienda 4ºE. En ella se ha desarrollado e instalado un máster principal que gobierna todas las comunicaciones. A él, desde los controladores de cada vivienda, llegan todas las comunicaciones, tanto del interior de las viviendas como de los sistemas de energía renovable (también instrumentados), instalados en la cubierta del edificio. En la figura 6.41 se puede apreciar el armario de comunicaciones instalado en la vivienda 4ºE.

Hasta aquí la instrumentación desarrollada e instalada corresponde al interior de las viviendas. Además, ambas disponen de instalaciones de energía renovable. En concreto, la vivienda 4ºE tiene instalados en la cubierta del edificio una cadena de ocho paneles fotovoltaicos y, en lo que corresponde a la instrumentación, dispone de medida de energía por cada panel y de la instalación completa a la entrada de la vivienda. Además, cada panel dispone de un sensor de medida de temperatura superficial, lo cual permite monitorizar el comportamiento del panel respecto a sobrecalentamientos que indicarían mal funcionamiento.

En la figura 6.42 se muestra la instalación renovable de la vivienda 4ºE con la sensorística comentada. El esquema de la figura 6.42 se conecta con el de la figura 6.17. Respecto a la vivienda 4ºF, ésta tiene instalado en la cubierta del edificio una cadena de seis paneles fotovoltaicos y un aerogenerador, tal y como se aprecia en la figura 6.43. En lo que respecta a la instrumentación, consta de un medidor de energía generada por panel, otro de la energía total generada por el sistema de renovables (panel+aerogenerador), y un medidor de la energía que entra en la vivienda, la cual, si el sistema de renovables no es suficiente, tiene una componente de la red. Del mismo modo que en la vivienda 4ºE, la instalación fotovoltaica del 4ºF dispone también de medida de temperatura superficial de los paneles para

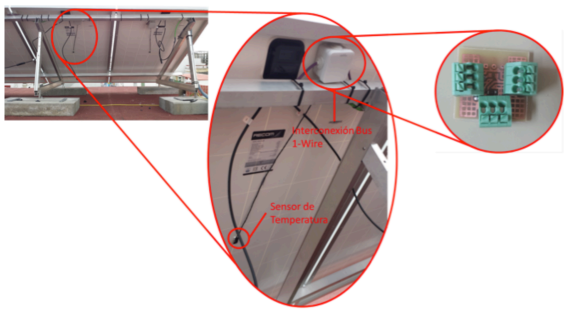


Figura 6.44. Detalle de la conexión de los sensores de temperatura instalados en las viviendas 4ºE y 4ºF

el cometido ya explicado. En la figura 6.44 se muestra en detalle la conexión de los sensores de temperatura instalados en las viviendas 4ºE y 4ºF.



Figura 6.45. Detalle de piranómetro, anemómetro y veleta de la instalación meteorológica instalada



Figura 6.46. Control de errores de la vivienda 4ºE

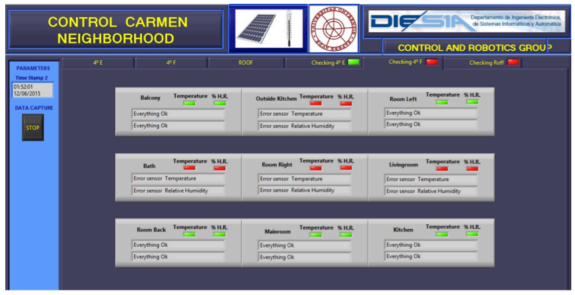


Figura 6.47. Control de errores de la vivienda 4ºF

En la figura 6.23 se muestra a nivel de diagrama de bloques cómo se ha configurado toda la sensorística de las instalaciones de energías renovables ubicadas en la cubierta del edificio, para las viviendas 4ºE y 4ºF. Nótese que también se monitoriza la temperatura de cada batería del banco (ver figura 6.26). Como ya se ha comentado, todas las comunicaciones de las dos viviendas van a parar al máster principal (figura 6.41), ubicado en el armario de comunicaciones de la vivienda 4ºE.

Por último, en lo que tiene que ver con el *hardware* de instrumentación, se ha instalado en la cubierta del edificio una estación meteorológica que consta de anemómetro, veleta y piranómetro (figura 6.45). Las señales de la estación meteorológica son integradas también en el canal de instrumentación, tal y como se muestra en la figura 6.23.

Para la adquisición y posterior almacenamiento de todas las señales de las viviendas bajo estudio se ha desarrollado una aplicación software (instrumento virtual), que toma los datos, detecta errores en la comunicación, almacena y permite la realización de gráficas e informes. En la figura 6.46 se muestra el control de errores de la vivienda 4ºE. En la figura 6.47 se muestra el control de errores de la vivienda 4ºF. En la figura 6.48 se muestra la pantalla de

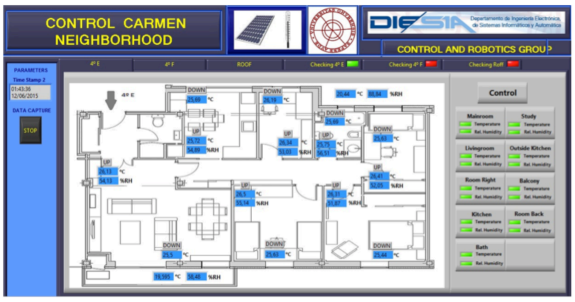


Figura 6.48. Pantalla de medición de temperaturas y humedades de la vivienda 4ºE

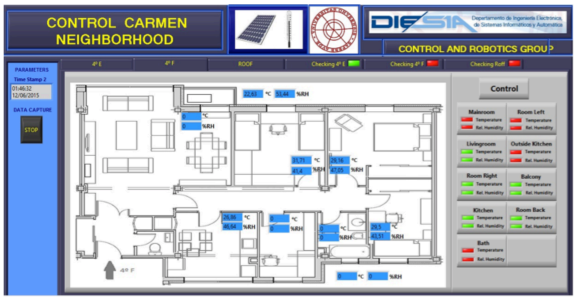


Figura 6.49. Pantalla de medición de temperaturas y humedades de la vivienda 4ºF



Figura 6.50. Monitorización de la producción de la vivienda 4ºF y las temperaturas de sus paneles

medición de temperaturas y humedades de la vivienda 4ºE. En la figura 6.49 se muestra la pantalla de medición de temperaturas y humedades de la vivienda 4ºF. Por último, en la figura 6.50, se observa la monitorización de la producción de la vivienda 4ºF y las temperaturas de sus paneles (en la 4ºE se observaría algo similar pero para ocho paneles).

Como se ha comentado, el instrumento virtual desarrollado permite realizar procesamiento de los datos medidos. Como ejemplo se muestran en la figura 6.51 las temperaturas por estancias de la vivienda 4ºF para un día cualquiera, y para la misma vivienda las humedades por estancia para otro día cualquiera en la figura 6.52.

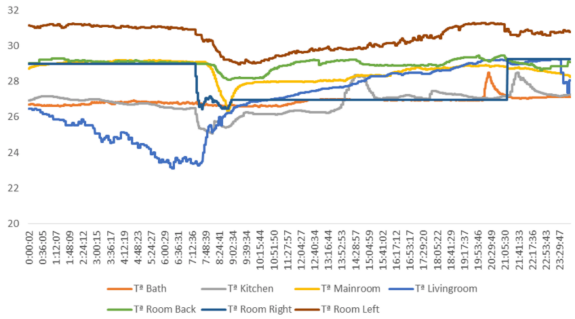


Figura 6.51. Temperaturas por estancias de la vivienda 4ºF para un día cualquiera

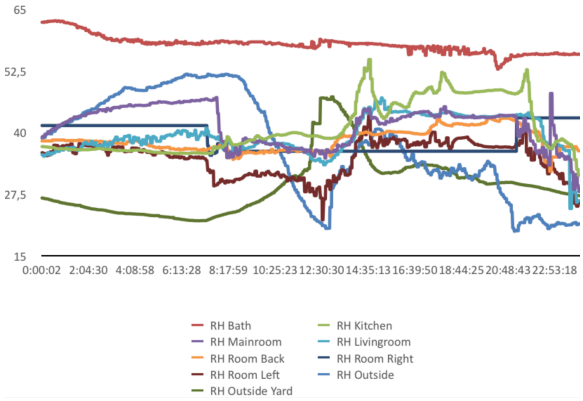


Figura 6.52. Humedades por estancias de la vivienda 4ºF para un día cualquiera

Toda la instrumentación desarrollada se incluye en el Anexo 6.5.1 *Instrumentación desarrollada y procesamiento de datos*.

6.2.5.2 Datos en tiempo real

En el Anexo 6.5.2 *Datos en tiempo real* se incluyen a modo de muestra algunos de archivos de datos que se están registrando en tiempo real en las viviendas 4ºE y 4ºF. En la figura 6.53 podemos ver un ejemplo de matriz de datos correspondiente a un lapso temporal de unos minutos, en un día concreto, para una de las viviendas instrumentadas.

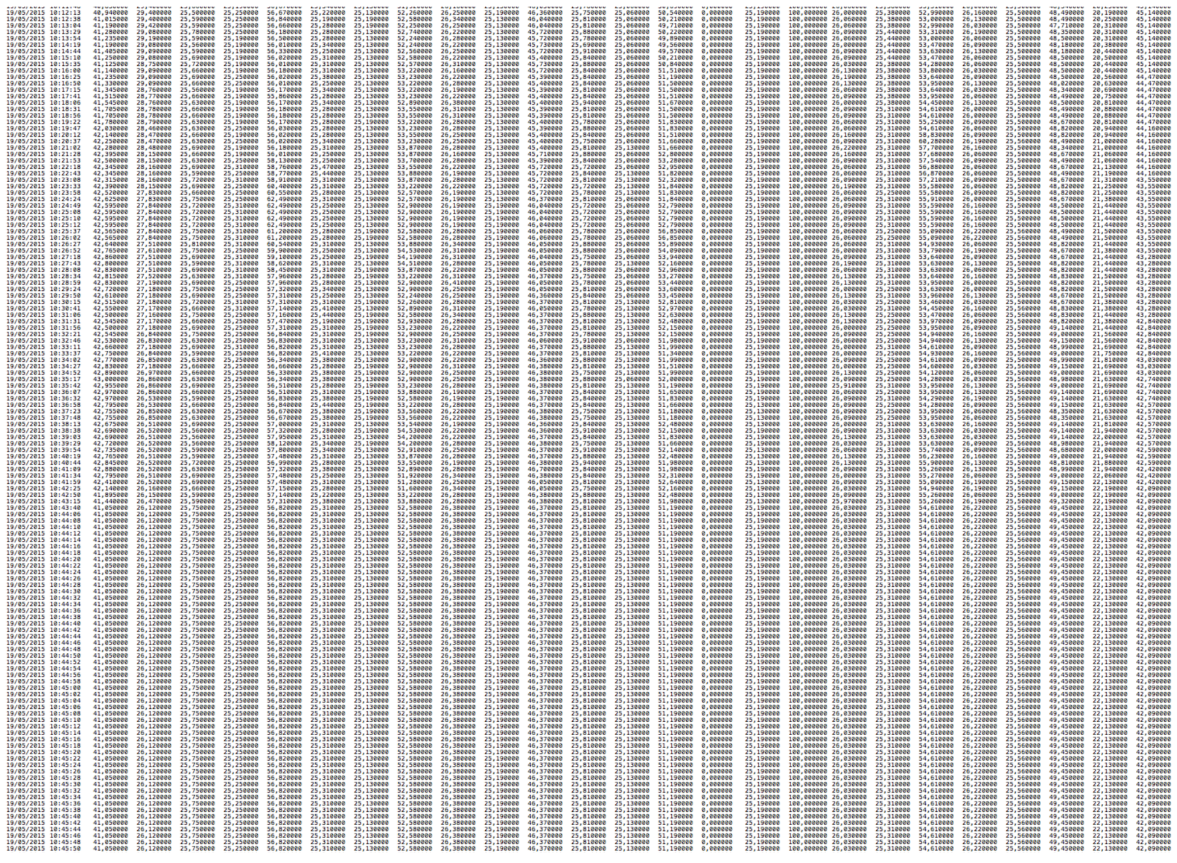


Figura 6.53. Matriz de datos correspondiente a un lapso temporal de unos minutos

6.3 METODOLOGÍA, EQUIPAMIENTO EMPLEADO Y DESARROLLOS REALIZADOS

Una vez que se han descrito en la sección 6.2 de este documento todos los trabajos realizados en el proyecto, esto es, qué se ha hecho; ahora pasamos a desarrollar la metodología que se ha empleado para llevar a cabo los trabajos mencionados, esto es, cómo se ha hecho. Aquí incluimos también todos los desarrollos hardware/software llevados a cabo para la puesta en práctica de la metodología.

Para ello se desarrollan los bloques que se mencionan a continuación, los cuales coinciden con los epígrafes de los trabajos desarrollados:

1. Estudio urbano de las ocho capitales andaluzas.

2. Sistema de información geográfica (SIG).

3. Simulaciones energéticas.

4. Actuaciones de eficiencia y rehabilitación energética.

5. Instrumentación desarrollada y procesamiento de datos.

A continuación se desarrollan los procedimientos y metodologías empleados en cada uno de los bloques.

6.3.1 Estudio urbano de las ocho capitales andaluzas

Para localizar todos los núcleos de desarrollismo urbano correspondientes a las décadas 50, 60 y 70 en las ocho capitales andaluzas, se procedió en primer lugar a la recopilación de datos, mediante visitas realizadas al efecto, de todos los servicios administrativos vinculados con la materia: catastro, archivos municipales y gerencias municipales de urbanismo. Junto a esto se procedió a adquirir toda la información accesible desde la red: página de catastro, *Goolzoom™* y *Google earth™*. Por último, para cubrir el trabajo de campo en todas las capitales andaluzas, se contactó con arquitectos de cada una de las capitales, los cuales proporcionaron fundamentalmente planimetría e informes técnicos.
En el catastro se han mantenido reuniones con los técnicos encargados de las planimetrías

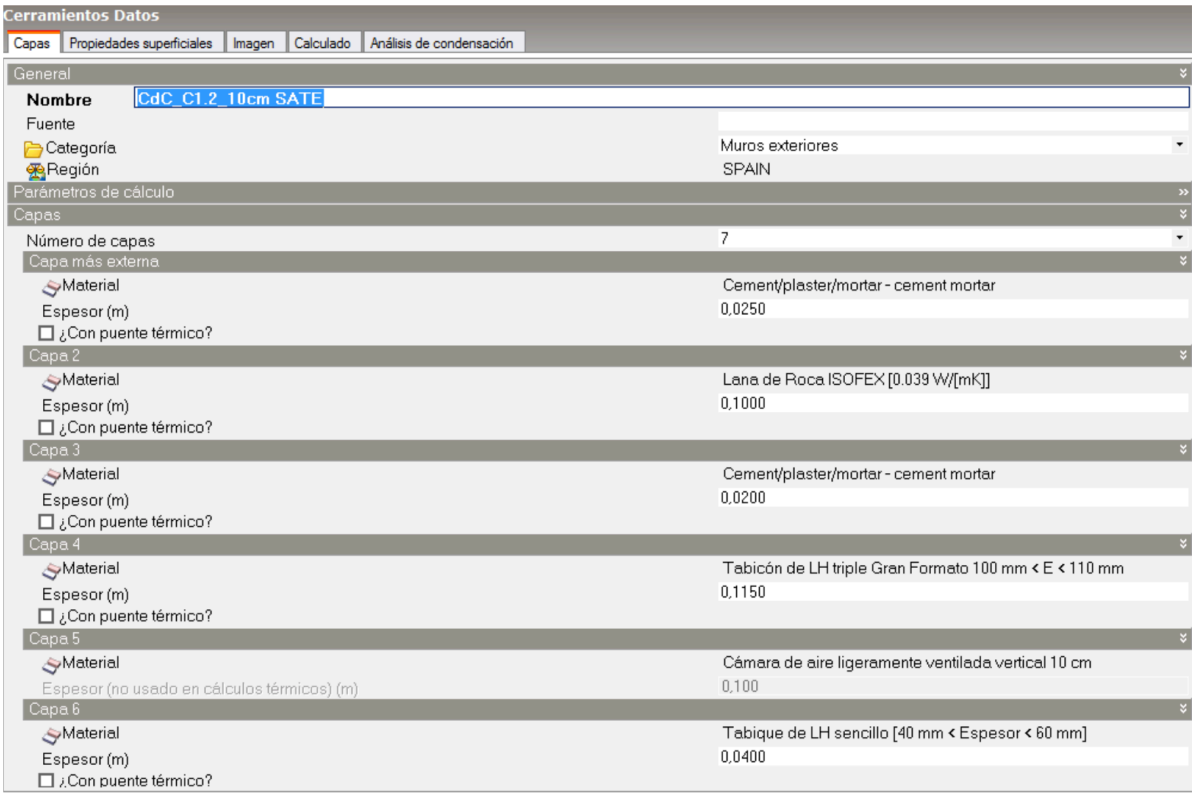


Figura 6.65. Ejemplo de definición de los elementos que componen un cerramiento en el modelo

catastrales, así como con los responsables de suministrarnos datos de interés para el proyecto: tipologías, crecimientos, años de construcción, altura, etc. Por otro lado, en los archivos hemos adquirido planos de las viviendas y de los crecimientos analizados. Asimismo, en las Gerencias de urbanismo, hemos contactado con los técnicos que canalizan y actualizan la información de la ciudad.

De la pagina de catastro hemos tomado altura de edificación y años de construcción. De la red, a través de *goolzoom* y *google earth*, hemos obtenido planos y visualización de los crecimientos. Esto ha permitido analizar la homogeneidad edificatoria, los volúmenes y el carácter constructivo de la edificación.

Toda la información recopilada fue volcada en un plano base para cada capital, donde hemos ido señalando los distintos crecimientos según la década en la que surgieron. Toda la información, una vez analizada y dividida en cada una de las décadas de estudio, se volcó en un SIG que ha sido desarrollado específicamente para el proyecto, del cual se hablará en el punto siguiente.

Como ya se mencionó en el apartado 6.2 de este trabajo de investigación, en la ciudad de Huelva se ha hecho un trabajo de campo a nivel de interior de vivienda, cuyo desarrollo fue el siguiente: una vez identificados los crecimientos por décadas, se estudió para cada uno de los tres periodos un número de viviendas suficientemente representativo desde el punto de vista constructivo, tipológico y funcional. Este estudio lo realizamos, a parte de por el conocimiento que tenemos de nuestra ciudad, gracias al estudio de la planimetría existente en el Colegio Oficial de Arquitectos de Huelva y en los Archivos Municipales de Huelva. Este proceso ha entrañado mucha dificultad, ya que hemos tenido que estudiar memorias y planos de proyectos que en algunos casos se habían perdido o en el mejor de los casos estaban incompletos.

Paralelamente al estudio de los proyectos, teníamos que programar las visitas a las viviendas para comprobar y, en la mayoría de los casos, completar los datos recogidos en el estudio de los proyectos. Para realizar estas visitas, teniendo en cuenta la dificultad que conlleva acceder a viviendas privadas, elaboramos unas cartas de adhesión al proyecto (ver Anexo 6.7.1 *Permiso de propietarios para el acceso a sus viviendas*), que van firmadas por el propietario de la vivienda y por el director del proyecto de investigación, donde se recogen una serie de estipulaciones que acepta libremente el propietario para poder realizar las actuaciones demandadas por el proyecto en cada vivienda.

El trabajo de campo en cada una de las viviendas analizadas consistió en primer lugar en actualizar los datos planimétricos y constructivos que habíamos obtenido de las diferentes fuentes antes mencionadas. En algunas viviendas, al carecer de información documental previa, tuvimos que levantar desde cero los croquis de planimetría. Una vez realizada y digitalizada la planimetría, tomábamos los siguientes datos del barrio y de las viviendas para poder posteriormente realizar las fichas definitivas de cada una de ellas:

1. Situación.
- Identificación.
- Dirección completa de la vivienda a estudiar.
- Foto aérea.
- Situación de la vivienda.

2. Escala de Barrio.
- Número de plantas del bloque.
- Altura total del bloque.
- Situación de la vivienda a estudiar dentro del bloque, colocando la fachada paralela al borde del papel.
- Posición del norte.
- Altura de los edificios colindantes.

3. Escala Vivienda.
- Estado previo.
- Altura libre interior.
- Fotografías que ayuden a entender la vivienda.
- Definir las capas de los cerramientos (C1, C2, etc.).
- Definir las capas de las medianeras (M1, M2, etc.).
- Definir las capas de las particiones interiores (T1, T2, etc.).

- Definir las capas de los forjados (F1, F2, etc.).
- Identificar posibles puentes térmicos.
- Identificar huecos practicados en fachada y/o cubiertas.
- Estudiar el uso de la vivienda (ocupación/ hora en diario y festivo).
- Identificar los equipos presentes en la vivienda (instalaciones).
- Tipo de puertas.
- Tipo de carpinterías de ventanas.
- Tipo de vidrio.

Finalizado el trabajo de campo, realizamos de cada una de las viviendas la versión definitiva de toda la planimetría ya digitalizada (planos en .dwg).

Por último, la presentación de todo el trabajo realizado se condensa en dos fichas por cada vivienda estudiada (ver figuras 6.3 y 6.4). Una ficha a escala más urbana donde analizamos la estructura del barrio y la ubicación de la vivienda en el mismo, con todos los datos e información gráfica necesaria para su correcto análisis. En la segunda ficha nos centramos en la vivienda, con una representación actualizada de la planta y todos los datos recogidos en las visitas a cada una de ellas. Estos datos fueron utilizados posteriormente para realizar las simulaciones con herramientas informáticas para el estudio energético.

6.3.1.1 Medidas de transmitancia, radiación térmica y estanqueidad

Para la medida de la transmisividad térmica de las envolventes de las 19 viviendas elegidas como modelo, se ha utilizado el equipo de la figura 6.54. Se trata del instrumento multifunción Testo 435-2, el cual, dotado de las apropiadas sondas de temperatura (figura 6.55), permite medir el coeficiente U.



Figura 6.54. Instrumento multifunción Testo 435-2



Figura 6.55. Sondas de temperatura



Figura 6.56. Cámara termográfica Testo 875-1i

La medida del coeficiente U (W/m²K) es compleja y tediosa, ya que requiere un elevado gradiente térmico entre las paredes de la envolvente a medir, aunque no hay estudios concluyentes al respecto. De hecho, hemos obtenido información diferente según las fuentes consultadas. En general, cuanto mayor gradiente térmico interior/exterior hay más fiable será la medida, ya que hay más transferencia de calor; sin embargo hemos de tener en cuenta que difícilmente se pueden obtener gradientes térmicos superiores a 20ºC en una vivienda habitada (esto no es fácil de conseguir en Andalucía). La primera estrategia para lograrlo, correspondiente a clima de invierno, consiste en que haya mucho frío fuera y una temperatura alta dentro de la vivienda. La segunda es hacer medidas en pleno verano con muy alta temperatura exterior y un sistema de climatización muy potente en el interior de la vivienda. Dicho esto, nosotros hemos comprobado mediante multitud de medidas, que lo más importante es conseguir, a partir de un determinado gradiente térmico (en torno a diez grados e incluso menos), que el equipo se estabilice. A partir de ahí, realizando una gran cantidad de medidas sobre la misma envolvente, se puede obtener un valor medio que aporta bastante fiabilidad, sobre todo si lo que se pretende es comparar la envolvente no actuada con la envolvente actuada, ya que en

ese caso al tratarse de una medida diferencial se cancelan los errores.

Puesto que la calidad de la medida la debíamos conseguir por repetitibilidad de la misma y no por elevado gradiente térmico, el procedimiento ha sido muy tedioso, ya que cada medida de envolvente ha empleado varios días, con el consiguiente alojo de equipos, desplazamiento de personal y molestia a los propietarios.

Las medidas desarrolladas se incluyen en el Anexo 6.1.3.

Respecto a la medida de la radiación térmica, hemos empleado la cámara termográfica Testo 875-1i de la figura 6.56. La termografía es una técnica ideal para determinar el rendimiento de un aislamiento y, por tanto, para comprobar el funcionamiento de la envolvente térmica de la vivienda respecto a la transmisividad de energía. Evidentemente, hay una correlación entre el resultado de la termografía y el de la medición del coeficiente U; sin embargo la fachada de una vivienda no tiene una envolvente uniforme (parte ciega y parte hueca de cerramientos, mochetas, emparchados de frentes de forjado y pilares de fachada, cajas de persiana, etc.), lo cual permite que la termografía complete la información de la medida de la transmisividad, ya que se visualiza de forma gráfica el comportamiento de todos los componentes de la fachada de la vivienda.

Nuevamente, y aunque con menos restricciones que en caso de la medida de U, la termografía necesita un adecuado gradiente térmico entre la cara exterior e interior de la envolvente. Teóricamente se recomiendan 10ºC para detectar de forma nítida problemas debidos a aislamientos. Así, durante la época de utilización de la calefacción, la firma térmica por falta de aislamiento se mostrará como áreas más frías en el interior y más calientes en el exterior. Sin embargo, en la época de utilización del aire acondicionado, la firma térmica será la contraria.

El proceso de realización de termografías a las 19 viviendas elegidas como modelos ha sido también muy tedioso, ya que se requieren condiciones óptimas ambientales. Sin embargo, la presencia de viento o el sol directo no permite la elaboración de termografías útiles. Consecuentemente, hemos tenido que realizar el trabajo siempre de madrugada, y con un nivel de exigencia hacia los propietarios muy elevado, ya que éstos debían tener unas condiciones de temperatura en el interior de su vivienda que permitiera conseguir el adecuado gradiente térmico que no invalidara la termografía.

SI bien es posible detectar filtraciones de aire mediante termografías, hay una técnica mucho más fiable consistente en la medida de estanqueidad de la vivienda. Esto se debe a que las filtraciones de aire se suelen producir por las diferencias de presión encontradas a lo largo de un edificio. Estas diferencias de presión pueden ser resultado del viento, pero también están causadas por las fuerzas convectivas inherentes a cualquier edificio, y por los desequilibrios de presión asociados a cualquier sistema de climatización.

Las diferencias de presión impulsan el aire hacia las fisuras presentes en la envolvente estanca del edificio. Las penetraciones practicadas en el cerramiento del edificio, como las realizadas para el paso de cableado o tuberías, son con frecuencia pequeñas y muchas veces no evidentes a simple vista. Estas penetraciones son muy nocivas respecto de la estanqueidad de la vivienda, de hecho son, junto a las pérdidas por juntas de carpinterías y cajas de persianas, las principales responsables de las pérdidas por calefacción, ventilación y aire acondicionado.

Con objeto de detectar estas nocivas fugas de aire, hemos realizado diferentes test de estanqueidad (conocido como Blower door test), que han permitido evaluar el nivel de infiltraciones de aire dentro de las viviendas. Para la ejecución del blower door test se procede inicialmente a instalar la puerta de membrana del aparato de medición en el acceso a la vivienda (normalmente puerta de entrada de la caja de escalera). A continuación se introducen los datos de la vivienda a ensayar en el software que controlar el ventilador (superficie útil, superficie construida, volumen de aire interior de la vivienda, etc.).
Iniciamos el ensayo propiamente dicho con el test de crucero, que consiste en insuflar aire en

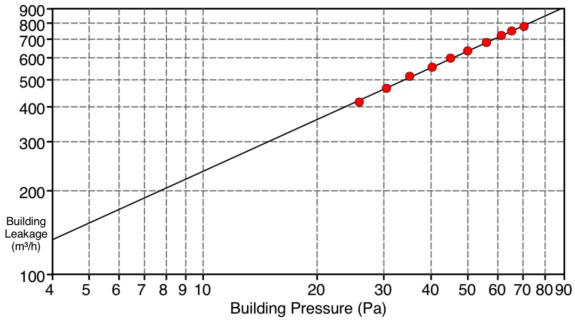


Figura 6.57. Volúmenes de aire movido por el ventilador para diferencias de presión interior exterior entre los 25 y los 70 Pa

el interior de la vivienda para detectar posibles fugas accidentales; fugas que habrán de repararse como paso previo a la realización de la prueba definitiva. Finalmente, y mediante la ejecución de un ciclo de sobrepresión (insuflado de aire interior mediante el ventilador acoplado a la puerta de membrana) y depresión (extracción de aire interior) que produce una diferencia de presión entre el aire interior y el exterior de la vivienda, controlado por un presostato, evaluamos el número de renovaciones hora (h-1), para cada una de las diferencias de presión estudiadas. El valor de h^{-1} a 50 Pa, es el valor que tomamos como referencia final del ensayo. La figura 6.57 representa gráficamente los volúmenes de aire movido por el ventilador para diferencias de presión interior exterior entre los 25 y los 70 Pa. Dividiendo los m^3/h entre el volumen de aire interior de la vivienda, obtenemos el valor de renovaciones a la hora h^{-1} a diferentes presiones.

6.3.2 Sistema de información geográfica (SIG)

El SIG EREBA 2020 ha sido desarrollado con *ArcGIS™* 9.3 y el apoyo de *Microsoft Excel™* 2010. Los pasos seguidos en su elaboración han sido los siguientes:

6.3.2.1 Selección de polígonos de crecimiento de interés

A fin de facilitar la selección de polígonos de crecimiento de interés en cada ciudad se realizó un primer plano de parcelas catastrales construidas o reformadas en los años 50 a 70. Estos planos fueron desarrollados a partir del mapa vectorial parcelario rústico disponible para descarga en formato shape en el portal de la Dirección General del Catastro [184]. La unificación del sistema de proyección de las 8 ciudades se llevo a cabo mediante el cambio de Huso (29 a 30) de los planos catastrales de Cádiz y Huelva. Con ayuda de ortografía digital (*Google Earth*, *Goolzoom*, Iberpix-IGN), se procedió a la selección y clasificación de los polígonos envolventes de crecimiento en cada ciudad, especificando además la tipologías de crecimiento y edificación.

Los criterios que se han seguido para la selección de los polígonos de crecimiento de interés en las décadas de los años 50, 60 y 70 han sido los siguientes:

1. Considerar sólo agrupaciones de tamaño razonable. En concreto hemos fijado el número en 40 o más referencias catastrales.

2. Cumplido el criterio 1, se ha analizado la información procedente del catastro, en el sentido que se da el caso de crecimientos fechados en una década antigua, por ejemplo los 50, que han sufrido reformas/ rehabilitaciones de gran calado (integrales), realizadas en décadas posteriores a la que resulta objeto de análisis (en los 70 como máximo), ya que estos crecimientos no son fiel reflejo de la primigenia época constructiva. Siguiendo esta pauta, los crecimientos objeto de estas actuaciones han sido desechados.

3. Cumplidos los criterios 1 y 2, se han desechado aquellas referencias de inmuebles de uso diferente al residencial (garajes, locales comerciales, oficinas, etc.), de modo que es posible que agrupaciones inicialmente consideradas por su tamaño (iguales o superiores a 40 referencias), resulten finalmente desechadas por su uso, ya que el número final de referencias de uso residencial era inferior a 40.

4. Cumplidos los criterios 1,2 y 3, y contando con más de 40 referencias de inmuebles de uso residencial, se ha seleccionado el polígono para ser considerado como

crecimiento de interés para la década que corresponda.

6.3.2.2 Implementación del SIG

Los *shapes* CREC y PAR_CAT, que combinan información propia del proyecto EREBA 2020 con información catastral, fueron desarrollados en paralelo y ciudad por ciudad. El tercero de los *shapes*, VI_HU, que mayoritariamente incluye información de las viviendas analizadas en la ciudad de Huelva, fue elaborado de forma independiente.

Con los polígonos seleccionados en el apartado anterior se realizo un CLIP de los *shapes* catastrales de cada ciudad. Los polígonos representaron la base espacial del *shape* CREC_ciudad y el resultado del CLIP la base del *shape* PAR_CAT_ciudad. En la mayor parte de las ciudades hubo que realizar un DISSOLVE en el *shape* PAR_CAT pues existía una excesiva subparcelación de las entidades catastrales. Esta operación fue realizada usando como base de disolución la referencia catastral común a las subparcelas (REF_CAT).

La mayor parte de los datos catastrales incluidos en los *shapes* CREC y PAR_CAT provienen del mapa vectorial parcelario rústico de cada ciudad. El número de viviendas asociadas a cada referencia catastral (NUM_VIV) se obtuvo sin embargo a partir de la información alfanumérica sobre propiedades rústicas, también disponible en el Portal de la Dirección General del Catastro. De estos archivos con información alfanumérica, se obtuvo para cada ciudad una tabla con los campos *referencia catastral* y *número de viviendas*. Estas tablas se unieron mediante JOIN a sus respectivos shapes PAR_CAT_ciudad, usando como campo de unión REF_CAT.

Para el campo *altura de edificación* (ALT_EDI), se realizó una tabla con los campos *referencia catastral* y *altura* a partir de los *shapes* de Catastro y se seleccionó la altura máxima asociada a cada referencia catastral. La tabla resultante, que relacionaba altura máxima y referencia catastral, también se unió mediante JOIN a sus respectivos *shapes* PAR_CAT_ciudad, usando como campo de unión REF_CAT.

Una vez compilada la información catastral necesaria e incorporada en los *shapes* PAR_CAT_ciudad se añadió el resto de información procedente del propio desarrollo del proyecto aún no incluida: Propuesta de Rehabilitación Energética (P_R_E), Tabla resumen de la Propuesta de Rehabilitación Energética (TAB_PRE) y Precio Unitario de la propuesta (PRE_UNI).

En los *shapes* CREC_ciudad, los valores de número de viviendas (NUM_VIV), número de bloques (NUM_BLOQ) y altura de edificación (ALT_EDI) de cada crecimiento, se obtuvieron a partir de la estadística básica de los respectivos *shapes* PAR_CAT_ciudad. Se añadió además

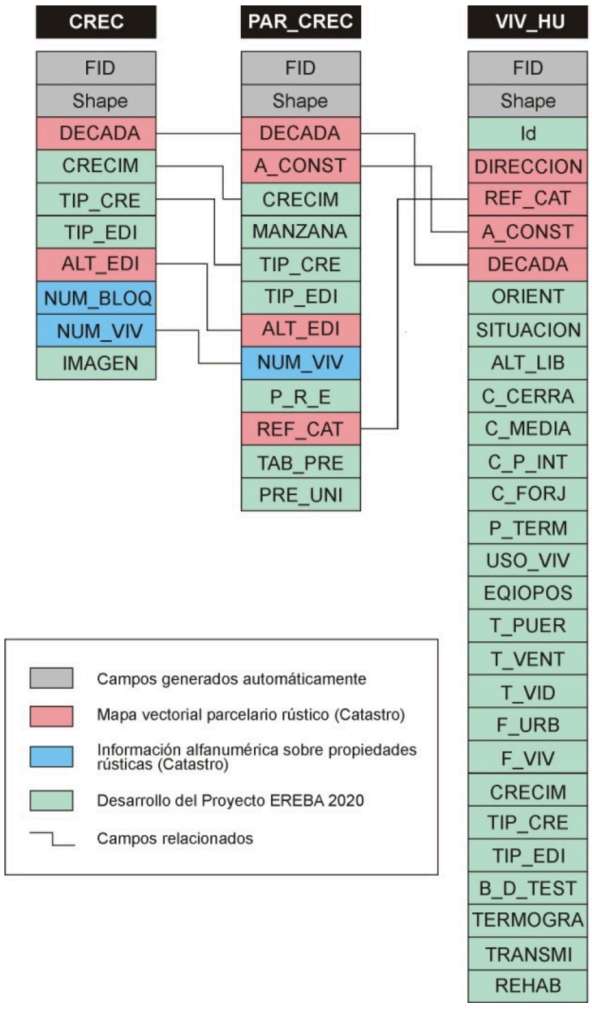


Figura 6.58. Origen de los campos incluidos en las tablas de atributos de los *shapes* de EREBA2020

una imagen aérea representativa de cada uno de los crecimientos seleccionados procedente de *Goolzoom* (campo IMAGEN). Finalmente, los *shapes* CREC_ciudad y PAR_CAT_ciudad de cada una de las capitales de provincia se unieron en dos únicos shapes: PAR_CAT y CREC.

El *shape* VIV_HU contiene información de las viviendas de Huelva estudiadas en el marco del proyecto. Esta información hace referencia tanto a características constructivas de las viviendas como a las distintas actuaciones llevadas a cabo. Se incluyeron además campos de información catastral útiles para vincular este *shape* con PAR_CAT y CREC. Toda esta información se integró en el VIV_HU una vez finalizadas las actuaciones realizadas en todas la viviendas de Huelva.

La figura 6.58 muestra el origen de los campos incluidos en las tablas de atributos de los *shapes* que conforman el SIG EREBA 2020. Se indican además los campos que relacionan las tres tablas entre sí.

6.3.3 Simulaciones energéticas

Para las simulaciones energéticas del proyecto se ha utilizado el motor de cálculo *Energy Plus™* V8.1. *Energy Plus* es una herramienta informática de libre distribución multiplataforma (Windows, Mac y Linux), desarrollada por el *U.S. Department of Energy* para la simulación energética de edificios. Modeliza cargas de calefacción, refrigeración, iluminación, ventilación y otros flujos de energía en edificios, además del consumo de agua. Incluye muchas innovaciones en el ámbito de la simulación no disponibles en otros programas, como el cálculo paso a paso por intervalos de tiempo reducido (menores de una hora), sistemas modulares e integrados en planta con balance de calor basados en zonas, flujo de aire multizona, confort térmico, uso sostenible del agua, ventilación natural y sistemas de energía renovables integrados.

Para el modelado de geometrías se ha utilizado la herramienta *Designbuilder™* V 4.1. *Designbuilder* es una herramienta informática modular que utiliza el motor de cálculo de

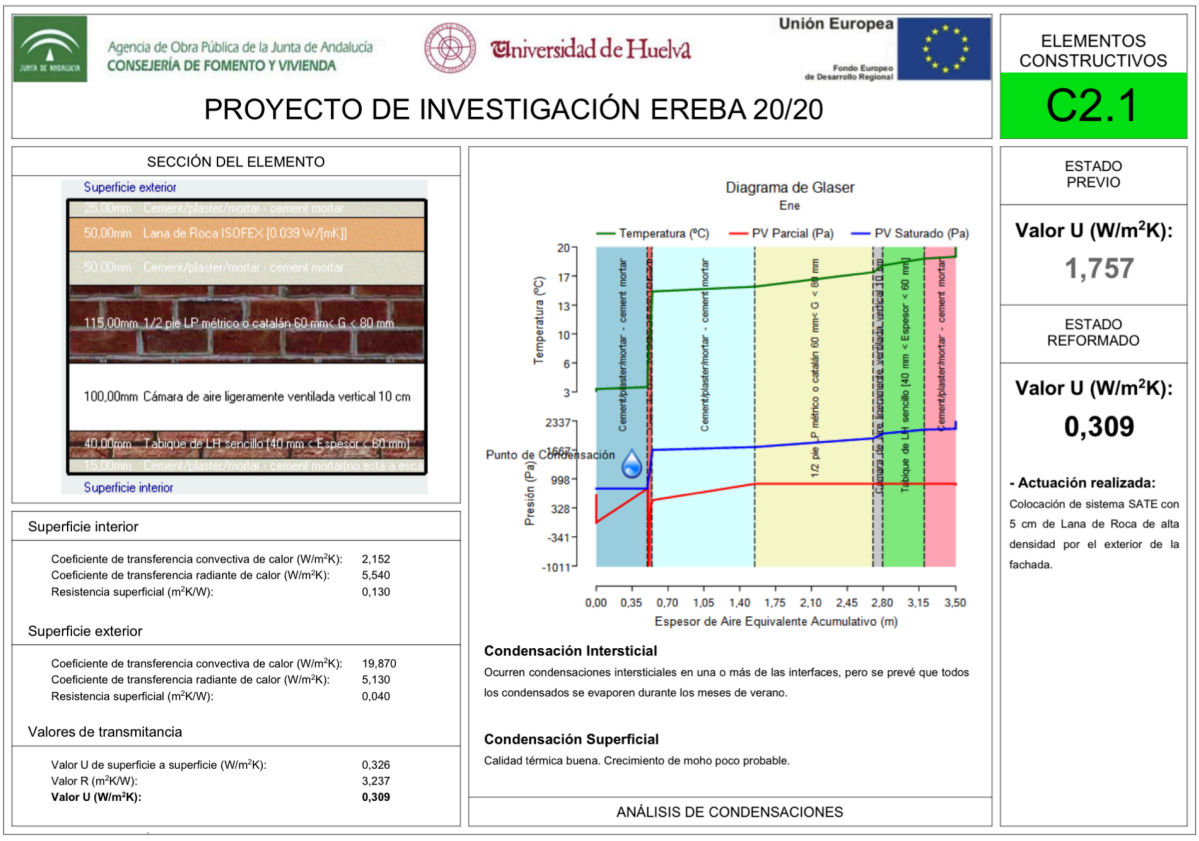


Figura 6.59. Ejemplo de *Ficha de vivienda*

Energy Plus y permite la visualización, la simulación energética, el estudio de la iluminación natural, el estudio de los sistemas HVAC, la optimización del coste, el análisis dinámico de fluidos y la implementación del sello LEED en el edificio.

El análisis de componentes de cada vivienda se ha realizado, para cada elemento constructivo (cerramientos, particiones y medianeras) identificado en las *Fichas de viviendas*, en una ficha donde se recogen datos de U, análisis de condensaciones y detalle de las capas que forman el elemento constructivo (ver Figura 6.59).

De cada cerramiento se ha generado una ficha comparativa entre estado previo del cerramiento y cerramiento en estado previo y reformado. Con toda esta información por vivienda, el siguiente paso consiste en modelizar el comportamiento energético para cada vivienda específica. El proceso que se describe a continuación se ha repetido al menos 264 veces para cada una de las viviendas específicas analizadas en este proyecto de investigación.

6.3.3.1 Descripción del proceso de modelado energético

A continuación describimos el proceso de cómo se ha modelado y simulado el comportamiento energético de una vivienda tipo.

6.3.3.1.1 Información previa

El primer paso llevado a cabo es el modelado en *Design Builder*, que consiste en generar un archivo con un dibujo en 2D y extensión .dxf con los puntos de referencia que nos interesen de la planta de la vivienda.

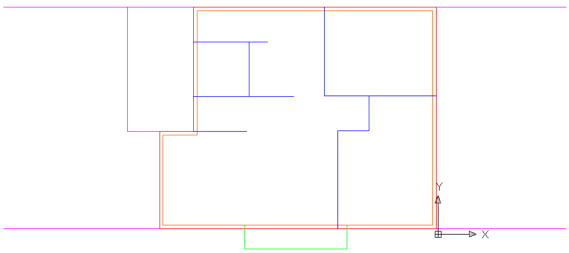


Figura 6.60. Esquema de importación a *Designbuilder*

Así, importamos a *Design Builder* (ver figura 6.60):

- La línea de la cara interior de los cerramientos, que coincide con la superficie útil de la vivienda (naranja).
- Una línea equidistante a 10 cm de la superficie interior, medido hacia el exterior (rojo).
- Las líneas que definen el eje de las particiones interiores (azul).
- Las líneas que representan el borde exterior de los voladizos y balcones volados sobre el plano de la fachada (verde).
- Las líneas que representan el borde exterior de los edificios medianeros (magenta).

A la hora de importar el archivo .dxf a *Design Builder* es necesario definir la altura de la solería interior, para que la vivienda quede correctamente situada dentro del conjunto del edificio.

El otro elemento fundamental para el modelado en *Design Builder*, es la definición de las componentes de la vivienda y su organización mediante plantillas.

Los componentes y plantillas permiten agilizar enormemente la definición de los modelos, al contar con elementos ya predefinidos que podemos cargar de una sola vez en el programa. *Design Builder*, cuenta con numerosos elementos ya precargados, listos para su uso (plantillas de cerramientos, horarios de ocupación, curvas de rendimiento, etc.). No obstante, para este proyecto hemos creado nuestras propias plantillas y componentes, ahorrando un valioso tiempo debido a que trabajamos sobre tipologías similares de edificios.

Definimos cada uno de los cerramientos de fachada, particiones interiores, medianeras, cubiertas y forjados de cada una de las viviendas y las ordenamos en plantillas (ver figura 6.61). Por ejemplo, la plantilla de cerramientos de la vivienda X contiene el cerramiento, las particiones, la cubierta, etc. de la vivienda correspondiente. Al cargar la

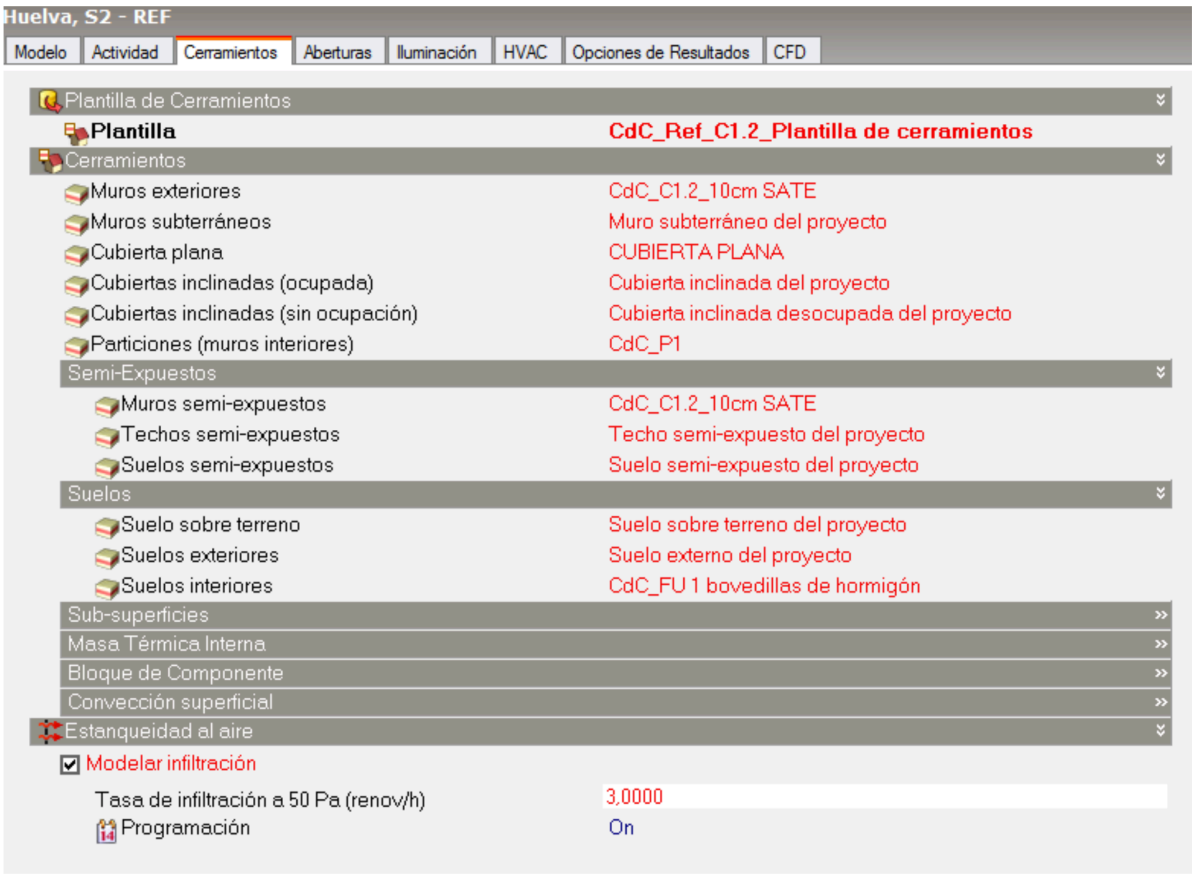


Figura 6.61. Ejemplo de plantilla de definición de elementos

plantilla, se cargan al modelo todas sus componentes de forma automática.

De la misma forma se ha realizado con las pestañas de Actividad, Aberturas, Iluminación y HVAC. Puede hacerse antes o después del modelado geométrico de las viviendas.

6.3.3.1.2 Definición del lugar de ubicación

Como paso previo a la definición de la vivienda, es necesario definir el sitio donde se ubica.

En la pestaña *Datos del sitio* (ver figura 6.62), hemos creado una plantilla para cada una de las ocho capitales andaluzas (en este caso Huelva), en la que se detalla su latitud, longitud, la orientación de la vivienda y el archivo de

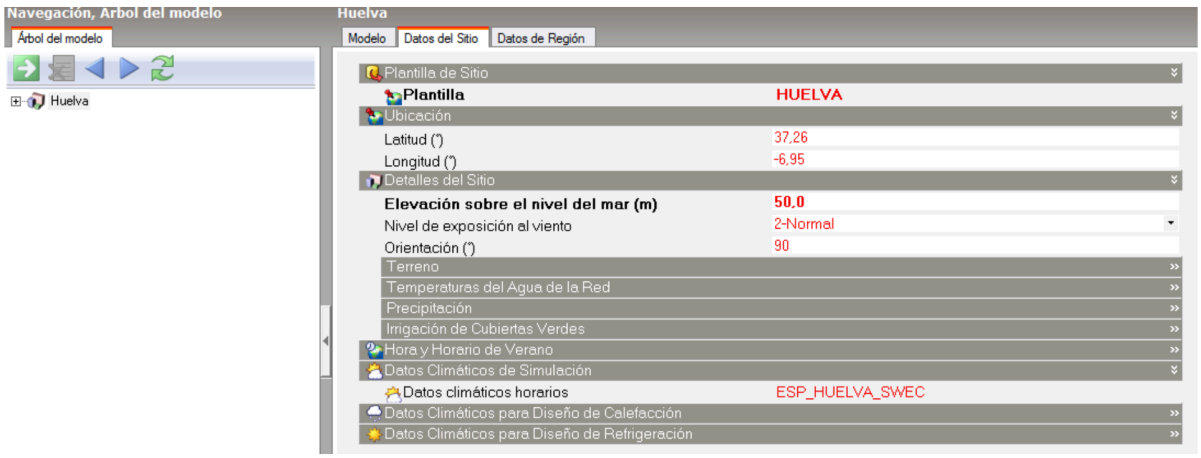


Figura 6.62. Ejemplo de árbol de modelado de edificio

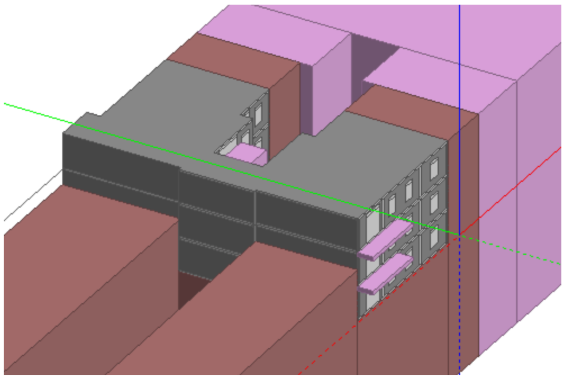


Figura 6.63. Tipos de bloques de modelado

datos climáticos que el programa tendrá en cuenta a la hora de realizar la simulación energética (con extensión .swec).

6.3.3.1.3 Modelado geométrico

Se ha optado por la opción de importar planos 2D en .dxf con referencias a puntos, como base para el trazado del modelo.

Una vez creado el *Sitio*, podemos añadir un edificio. Si ya tuviéramos creadas todas las plantillas, podríamos cargarlas en este instante o cargarlas más adelante. En este sentido, el programa es bastante flexible.

A nivel Edificio en el árbol de modelado de la izquierda en la figura 6.62, vamos añadiendo bloques para ir definiendo el edificio. Existen los siguientes tipos de bloques (ver figura 6.63).

- Bloque de edificio. Se define marcando los puntos a una equidistancia de 10 cm de la superficie interior de la vivienda (o cualquier otro espesor que decidamos), estableciendo un espesor de muro de 10 cm (sólo a efectos de representación gráfica) y la altura libre de la vivienda. Se representa en color gris oscuro.

- Bloque de componente. Existen varios tipos de bloques de componentes, pero hemos utilizado los de componente adiabáticos, que se representan en color burdeos, y los de componente estándar, que se representan en color magenta. Sirven para dibujar el entorno de nuestra vivienda. Serán de un tipo u otro en función del intercambio energético que realice nuestra vivienda con ellos. Se definen definiendo el perímetro en un plano y la altura de extrusión.

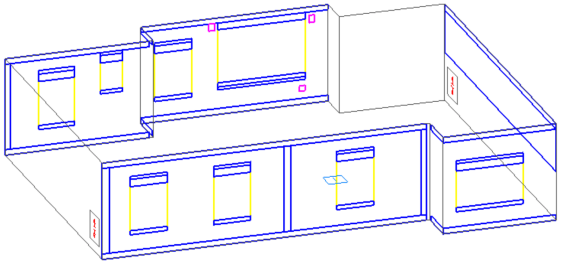


Figura 6.64. Modelado de puentes térmicos

Dentro del bloque de edificio que supone la vivienda a simular, se ha creado una zona térmica de forma automática. Se ha optado por considerar toda la vivienda como una única zona térmica, ya que no nos interesa estudiar el comportamiento energético de cada estancia de forma individual, sino el comportamiento de la vivienda en su conjunto.

A continuación es el momento, a nivel de zona, de ir definiendo los huecos y los puentes térmicos. Los puentes térmicos se definen como superficies de los cerramientos (llamadas Sub-superficies en *Design Builder*) en los que se modifican las capas que lo componen (ver figura 6.64). Los huecos se han representado en amarillo, los puentes térmicos en azul y las rejillas abiertas al exterior en magenta. El símbolo rojo, dentro del recuadro, representa la adyacencia adiabática de ese cerramiento.

Al definir en el programa una zona térmica, se modela la altura libre de los espacios. Según esto, el canto del forjado se reduce a una línea a lo largo de la fachada. Podemos asumir el pequeño error al dibujar el puente térmico en la parte superior de la fachada.

6.3.3.1.4 Definición de la envolvente térmica

En la figura 6.65 se aprecia cómo hemos definido cada uno de los cerramientos, medianeras, particiones interiores, cubiertas y forjados mediante la descripción de cada una de las capas que los conforman, partiendo de la base de datos de materiales del CTE, de la base de datos del Instituto Torroja de Edificación y de las fichas técnicas aportadas por los

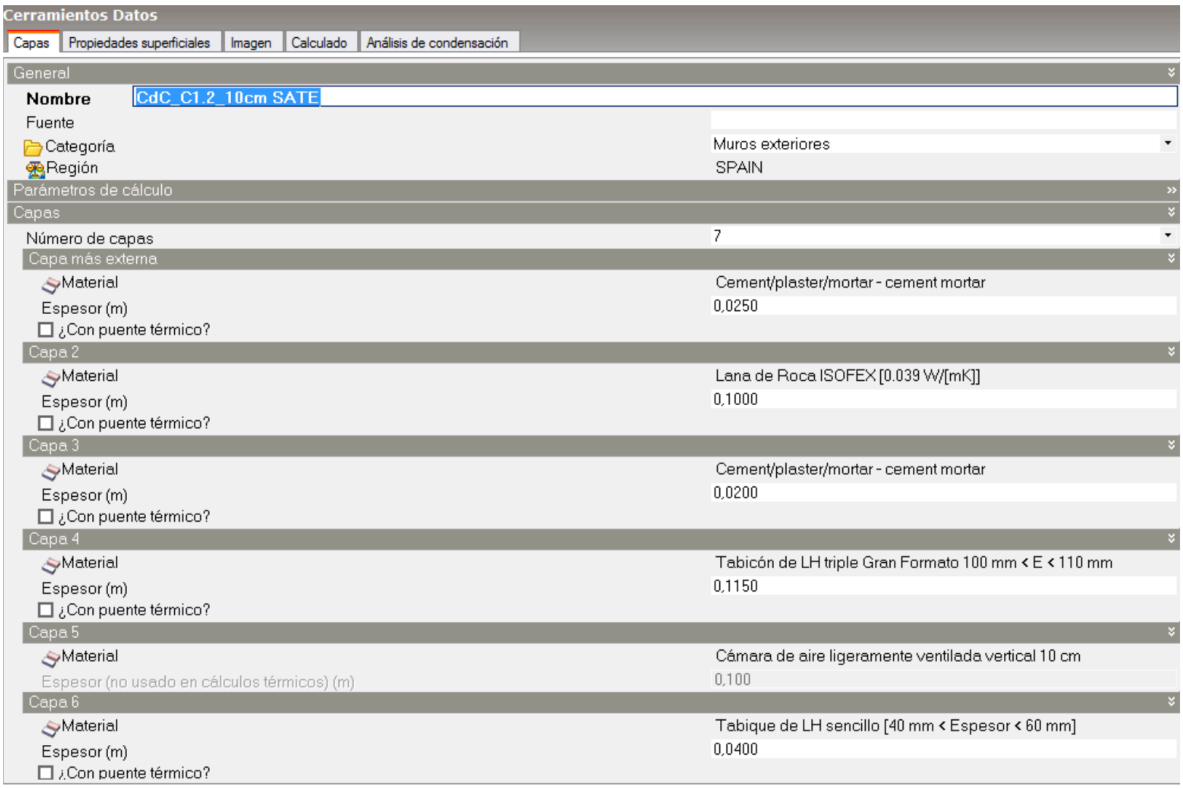


Figura 6.65. Ejemplo de definición de los elementos que componen un cerramiento en el modelo

fabricantes de materiales. Igualmente hemos definido también la calidad de los cerramientos con respecto a infiltraciones de aire incontrolado proveniente del exterior de la vivienda, o bien la tasa de renovaciones hora por infiltración, o bien los datos de un ensayo BDT, dependiendo del tipo de análisis que estemos realizando.

Para tener en cuenta el efecto de la tabiquería (porque ocupa volumen de aire que no es necesario climatizar), aunque no se han dibujado como particiones que definan zonas térmicas, las hemos definido como particiones libres (ocupan espacio pero no se tienen en cuenta en la simulación, y ésta es menos pesada) o bien fijando un espesor de cerramiento mayor del real, para que el volumen interior resultante sea el correcto.

Acto seguido, hemos pasado a definir el tipo de hueco más representativo de la vivienda, mediante la definición de sus marcos (valor de U, espesor, material, etc.) y de su tipo específico de acristalamiento (valor de U, factor solar, etc.). En la base de datos preconfigurada en *Design Builder* no existe la típica persiana enrollable española. Se ha tenido en cuenta su efecto en el sombreamiento de huecos, modificando los parámetros de una persiana de tablillas colocada por el exterior con una estrategia de control en función del horario de uso de la vivienda.

Los voladizos se han definido como bloques de componente estándar.

No se tiene en cuenta la *Ventilación natural calculada*, ya que el archivo climático utilizado en la simulación no contiene los datos de viento necesarios.

6.3.3.1.4 Definición del uso de la vivienda

El siguiente paso del proceso consistió en definir la ocupación y la tasa metabólica de las personas que habitan la vivienda, junto con sus horarios en la pestaña de *Actividad* (ver figura 6.66).

Se han detallado también aquí las temperaturas de consigna que desea mantener el usuario de cada vivienda en cuanto a la calefacción, la

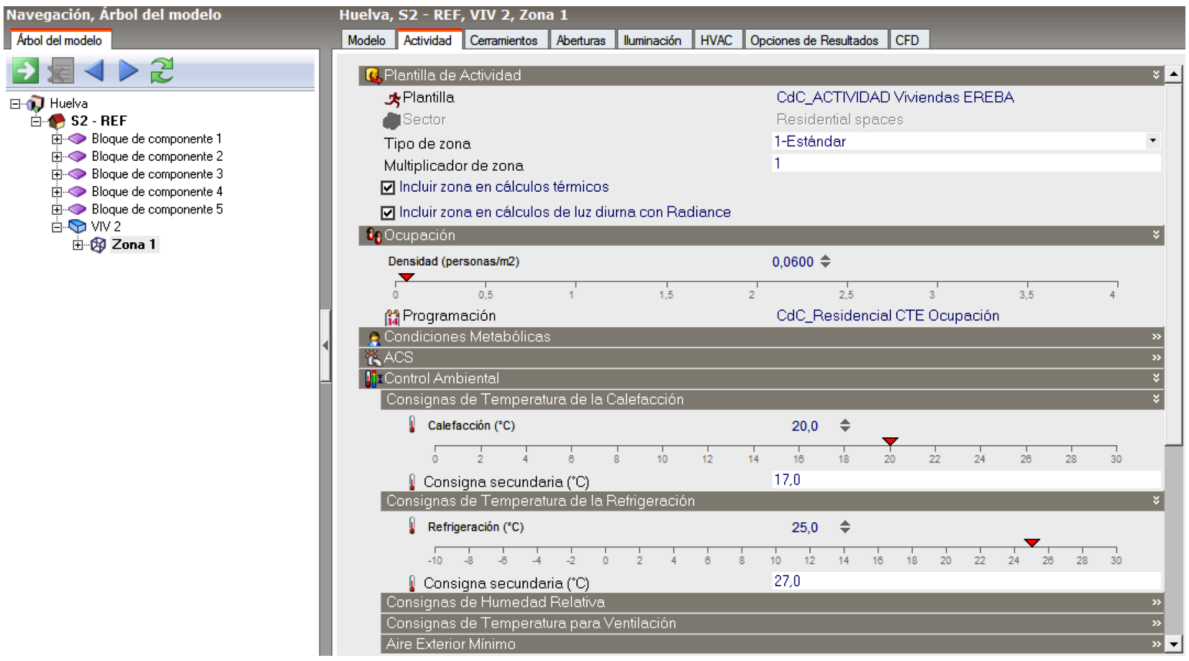


Figura 6.66. Ejemplo de definición de los elementos que regulan la actividad en el modelo

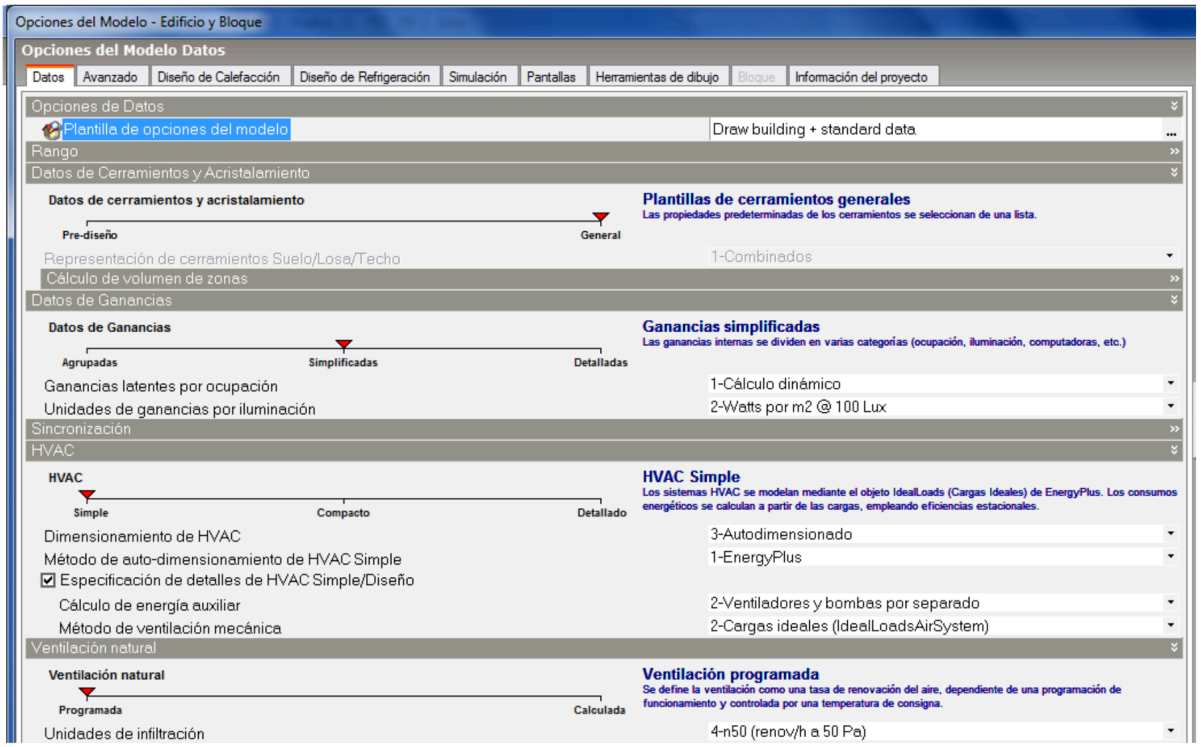


Figura 6.67. Ejemplo de definición del nivel de complejidad en el modelo

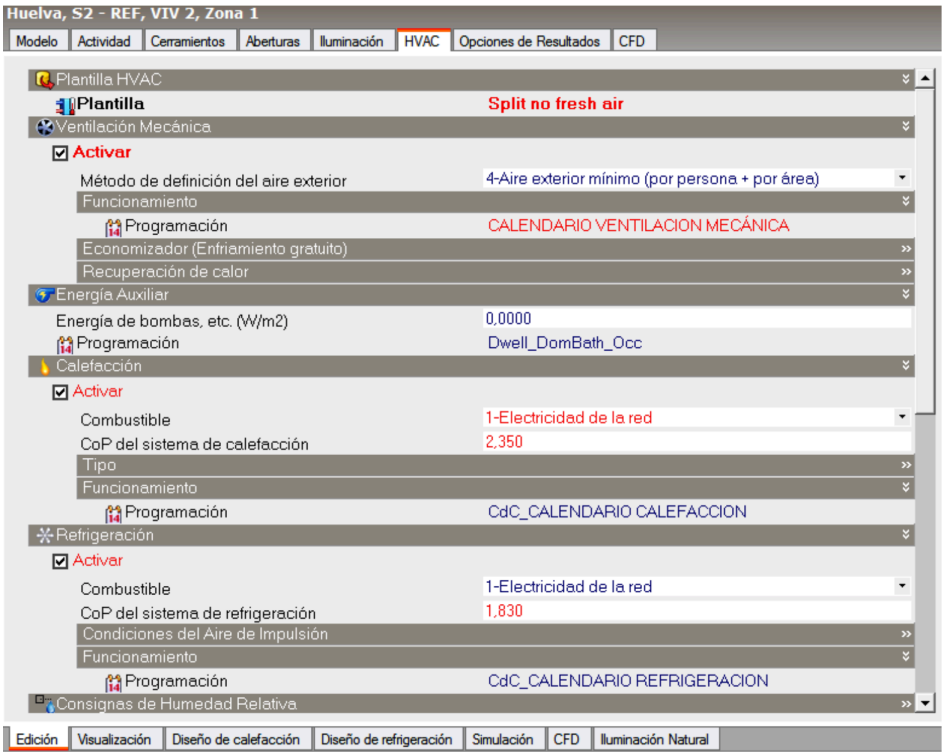


Figura 6.68. Ejemplo de definición de las HVAC en el modelo

refrigeración, posible ventilación natural y mecánica. Así como la demanda de agua caliente sanitaria.

Por último, se han definido las cargas internas, equipos electrónicos, de cocina, etc. y sus horarios de utilización.

6.3.3.1.5 Definición de las instalaciones de iluminación

Hemos definido la potencia por unidad de superficie y la iluminancia de cada vivienda para la simulación de los controles de iluminación artificial en función de sensores de luz natural.

Al no haberse intervenido en la instalación de iluminación en el estado reformado de las viviendas, se ha prestado mayor atención al resto de instalaciones, por tener mucha mayor repercusión en los resultados obtenidos.

6.3.3.1.6 Definición de las instalaciones térmicas

El modelado de las instalaciones de climatización y ACS puede realizarse en tres niveles de complejidad. Dado la gran cantidad de simulaciones a realizar y por ser suficiente el nivel de precisión requerido, se ha optado por el nivel Simple: mediante un sistema ideal y rendimientos medios estacionales.

Se puede cambiar de un modelo de definición a otro en las opciones del modelo (ver figura 6.67).

Partiendo de la plantilla preconfigurada de *Split no fresh air*, vamos cambiando los datos que nos interesen en función de la vivienda a simular. Con *HVAC Simple*, definimos las instalaciones térmicas mediante el combustible de la instalación, el rendimiento del equipo y su horario de funcionamiento cada día del año usando un calendario 7/12, en el que definimos un perfil de uso para cada día de la semana, de cada mes. Ver figuras 6.68, 6.69 y 6.70 en las que se muestran respectivamente la pestaña HVAC, un ejemplo de Horario o Calendario 7/12, y un ejemplo de perfil de uso para definir un horario o calendario.

6.3.3.1.7 Simulación energética

La simulación energética es el núcleo principal del programa y se basa en la última versión del

Editar programación - CdC_CALENDARIO CALEFACCION

Programaciones Datos

General

General

Nombre	CdC_CALENDARIO CALEFACCION
Descripción	
Fuente	CTE
Categoría	Espacios Residenciales
Región	General
Tipo de horario	1-Programación 7/12

Días de diseño

Método de definición del día de diseño	1-Uso final predeterminado
Utilizar uso final predeterminado	5-Calefacción

Perfiles

Mes	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Ene	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE
Feb	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE
Mar	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE
Abr	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
May	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Jun	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Jul	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Ago	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Sep	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Oct	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE
Nov	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE
Dic	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE	Calefacción CTE

Figura 6.69. Ejemplo de definición del calendario de calefacción en el modelo. Programación de datos

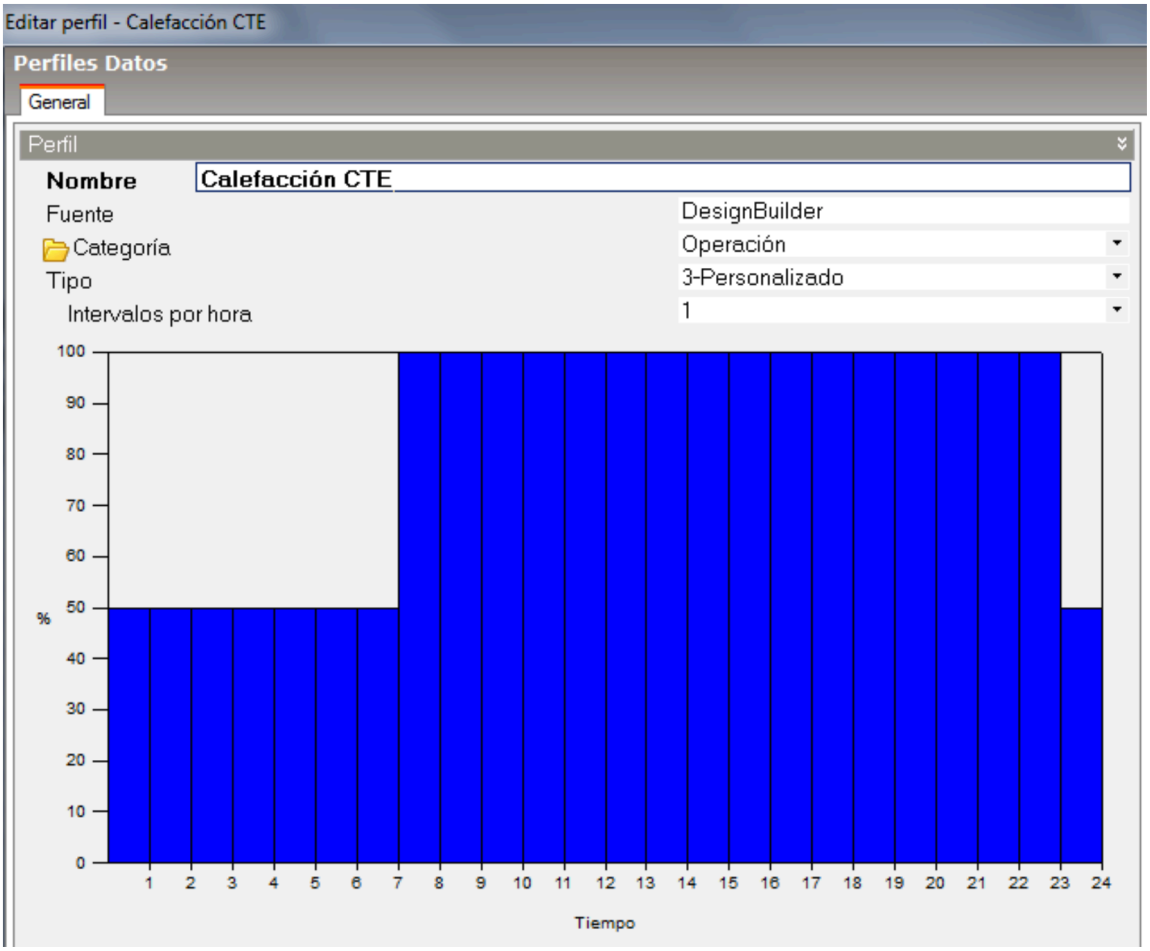


Figura 6.70. Ejemplo de definición del calendario de calefacción en el modelo. Perfil de datos

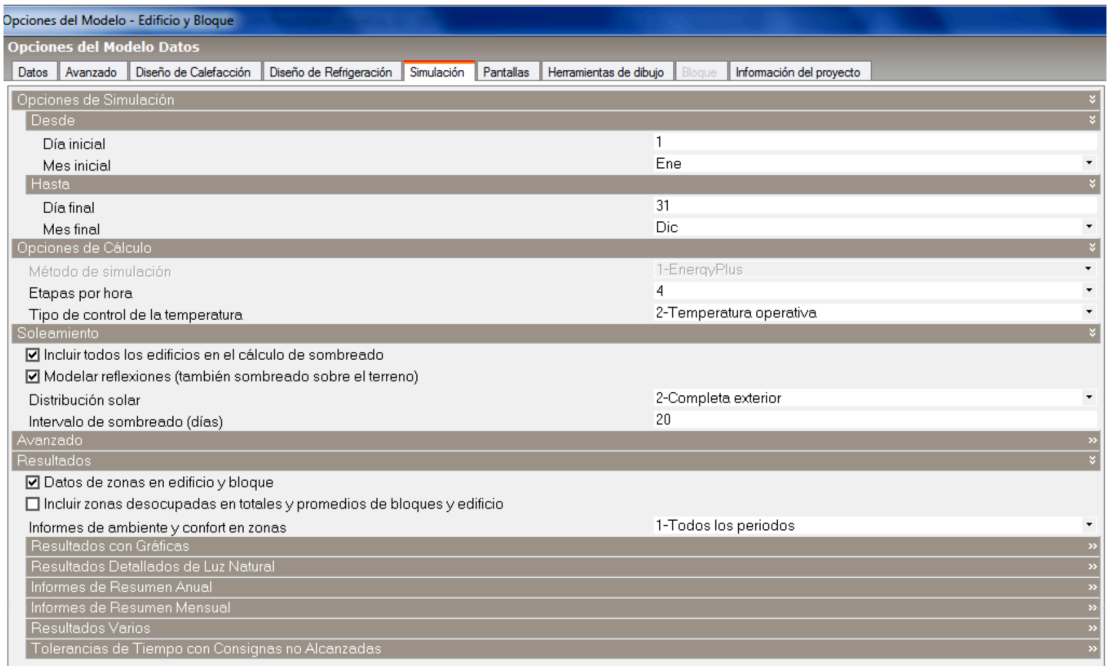


Figura 6.71. Temperatura operativa. Opciones de simulación

motor de simulación *Energyplus* para realizar los cálculos energéticos.

DesignBuilder lleva integrado *Energyplus* de forma que cuando pulsamos el botón de *Simular*, automáticamente se lanza el cálculo en *Energyplus* y *DesignBuilder* recoge los resultados que éste le proporciona para mostrarlos gráfica y numéricamente.

Se le puede pedir a *DesignBuilder* que nos muestre, una vez realizada una simulación, los siguientes datos, en forma de gráficas o datos en tablas exportables a otros formatos:

- Cargas internas y cargas máximas de calefacción y refrigeración conforme al estándar ASHRAE.
- Demandas de calefacción y refrigeración de nuestro edificio.
- Consumos energéticos de calefacción, refrigeración y ACS.
- Emisiones de CO_2 asociadas al consumo de energía.
- Cálculo de las condiciones ambientales interiores (temperatura y humedad), en cualquier instante del año.
- Cálculo de las condiciones de confort.
- Balance Térmico: ganancias solares, por ocupación, iluminación, etc. así como las pérdidas en ventilación, transmisión de cerramientos, etc.

Además, es posible generar los informes resumen de *Energyplus* desde *DesignBuilder*. Estos informes agrupan mucha información relativa al modelo y los resultados.

Se ha realizado una simulación anual, pidiéndole al programa que almacene los datos hora a hora durante el año completo y que calcule considerando la temperatura operativa. En las figuras 6.71 y 6.72, pueden observarse las opciones de simulación y las opciones de resultados de gráficas que da el programa.

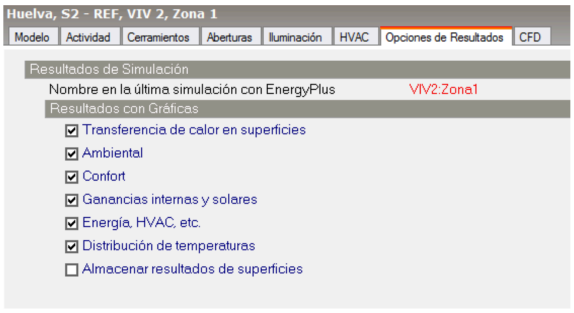


Figura 6.72. Temperatura operativa. Opciones de resultados de gráficas

6.3.3.2 Valoración económica de las simulaciones

Para el cálculo del presupuesto económico de cada una de las actuaciones de rehabilitación energética estudiadas se ha utilizado la herramienta informática *Presto™* V8.8. *Presto* en un *software* específico de mediciones y presupuestos de edificación y obra civil que a partir de un banco de precios específico genera un informe de medición y valoración organizado por capítulos y partidas, con la posibilidad de incluir precios descompuestos. El banco de precios utilizado para el análisis económico de las actuaciones ha sido el oficial de la Junta de Andalucía en su versión más reciente disponible, si bien en la mayoría de los casos, ha sido necesario ser complementado con la creación de precios propios específicos de rehabilitación energética al no existir éstos en el banco de precios oficial antes citado. Para ello ha sido fundamental la experiencia adquirida en el proyecto de investigación, en tanto en cuanto hemos tenido que afrontar ejecuciones novedosas en el campo de la rehabilitación energética, que nos han aportado un conocimiento singular del coste real de ejecución de cada una de estas partidas.

Para la comparación y el resumen de los valores obtenidos en la simulaciones energéticas y los cálculos de demanda para las distintas actuaciones se ha utilizado indistintamente la herramienta *Excel* de *Microsoft™* y la herramienta *Numbers* de *Apple™*.

6.3.3.3 Cálculo del periodo de amortización de las actuaciones

Para el cálculo del periodo de retorno de la inversión se ha utilizado la fórmula del *Precio Voluntario al Pequeño Consumidor* de electricidad, que es la nueva tarifa regulada en el mercado eléctrico y sustituye a la hasta ahora denominada *Tarifa de último recurso*. Esta tarifa comprende un término de potencia (€/kW) y un término de energía consumida (€/kWh). Tratándose de un mercado no regulado, susceptible a fluctuaciones del precio final al consumidor, en ambos casos se han adoptado valores muy próximos a los actuales, pero considerando un escenario de encarecimiento moderado como media de todo el periodo de amortización. En concreto, para el término de potencia se ha adoptado el valor de 4,40 €/kW mes, y para el término de energía 0,168 €/kWh.

Para el cálculo del periodo de amortización de las actuaciones, se toma como base el consumo de la vivienda en su estado sin actuar y, como consecuencia, su coste energético. A partir de aquí, se calcula el ahorro energético obtenido mediante la actuación y su coste (en este caso negativo) energético. La diferencia entre el coste energético sin actuar y el de la vivienda actuada nos aporta el ahorro en coste energético anual, el cual, divide al coste de la actuación de rehabilitación para proporcionar el número de años necesarios de amortización de la inversión económica de la actuación de referencia en cada caso de estudio.

6.3.4 Actuaciones de eficiencia y rehabilitación energética

Se ha afrontado la estrategia de rehabilitación energética en diferentes niveles de exigencia; siendo el practicado en calle Tres Carabelas 5, 4ºE el más ambicioso, y el practicado en plaza de los Columpios 1, 2ºD el menos.

Las actuaciones de eficiencia y rehabilitación energética realizadas en las viviendas 4º E y F de la calle Tres Carabelas 5 de Huelva, se han ejecutado en base a la documentación técnica redactada (ver Anexo 6.4.1 *Rehabilitación energética de la envolvente*). El personal de ejecución de la obra ha recibido formación específica de las empresas instaladoras *Isover™*, *Weber™* y *Soudal™*, así como de la dirección facultativa de las obras. En este caso se trata de dos actuaciones de rehabilitación muy ambiciosas realizadas durante un largo lapso de tiempo (abril-diciembre 2014), más del inicialmente previsto en la programación del proyecto, como consecuencia de la complejidad de la actuación y los continuos problemas con los vecinos que obligaban a minimizar el impacto de las obras.

La actuación de insuflado de cámara mediante lana mineral en calle Honduras se ha realizado

por empresa especializada en esta aplicación específica, y bajo la supervisión específica de la dirección facultativa de las obras. En este caso se trata de una intervención puntual, realizada a lo largo de un único día (9 de febrero de 2015) y por lo tanto de alcance limitado. Posteriormente se procedió a aplicar pintura nanoestructurada termoreflexiva en el exterior del cerramiento en esta misma vivienda.

La actuación de sellado y mejora de estanqueidad en la Plaza de los Columpios ha resultado un trabajo iterativo complejo, realizado desde un punto de vista casi artesano a partir de pruebas en serie y ensayo-error con el aparato de BDT. El conjunto de actuaciones ha supuesto el trabajo de tres días en total. A medida que el sellado de la envolvente se hacía más estanca y utilizando lápices de humo para detectar fugas menores, se ha mejorado notablemente el comportamiento a infiltraciones de aire de la vivienda en el estado inicial. El protocolo de actuación final quedaría resumido en la siguiente serie: ajuste de carpinterías, sellado de huecos de ventilación en cocinas, sellado de caja general eléctrica, sellado de corrugado de timbre y derivación individual, sellado de cajas de persianas, puntos singulares, etc.

Las actuaciones de sustitución de ventanas se han realizado por empresas especializadas, si bien cuidando específicamente el encuentro entre el marco de la carpintería y la obra gruesa. Ha sido necesario un control estricto por parte de la dirección facultativa sobre las labores de sellado de la carpinterías para evitar que permanezcan los puentes térmicos y fugas en la envolvente estanca de la vivienda, una vez sustituidas las antiguas ventanas por las nuevas. En la figura 6.73 se ilustra la problemática encontrada a efectos de conseguir que efectivamente la empresa instaladora de las ventanas ejecutase el trabajo siguiendo los estrictas especificaciones de sellado recogidas en el proyecto. La imagen se corresponde con la primera inspección girada a obra y la primera de las ventanas instaladas. La consecuencia directa de esta primera inspección fue ordenar la retirada inmediata de esa carpintería y su vuelta a colocación desde cero; ya que, a pesar de la insistencia de la dirección facultativa en la necesidad de mantener la continuidad de la



Figura 6.73. Problema de sellado detectado durante la ejecución de obra entre la caja de persiana y el marco



Figura 6.74. Problema de sellado entre la caja de persiana y el marco subsanado tras la inspección

banda expansiva y sellado posterior, no sólo no se ejecutó como es debido sino que incluso resulta posible apreciar en la fotografía cómo pasa la luz entre el premarco de panel fenólico (color marrón oscuro) y el marco de la carpintería (color blanco).

En la figura 6.74 se muestra una imagen definitiva de la misma ventana una vez subsanada la deficiencia. Se puede apreciar cómo el hueco entre la caja de persiana y el premarco es ahora inexistente y está perfectamente sellado.

Al respecto de la ejecución de la unidad de ventilación con recuperación de calor de alta eficiencia implantada en las viviendas de Tres Carabelas 4ºE y 4ºF, cabe decir que la instalación de redes de conductos de aire -aún siendo de bajo perfil- en viviendas sociales de muy reducida altura útil (2,33 m altura libre suelo-techo en algunas zonas) se complejiza enormemente. Ha sido necesaria una adecuada planificación en fase de proyecto (ver figura 6.34), y una cuidadosa ejecución para respetar los mínimos razonables de altura útil en el



Figura 6.75. Conductos de ventilación. Trazado en ejecución

pasillo (> 2,15 m). En la figura 6.75 se puede apreciar el proceso de ejecución del trazado de conductos.

Por otra parte, en lo relativo a la aplicación del revestimiento térmico por el exterior (sistema SATE) de lana mineral aplicado en el cerramiento exterior de las viviendas 4ºE y 4ºF de la calle Tres Carabelas, debemos decir que la repercusión económica de esta partida de obra ha sido anormalmente alta en el total del presupuesto de rehabilitación. Esto se ha debido, en primer lugar al hecho de tratarse de una técnica novedosa y todavía en proceso de implantación en el mercado de la construcción, por lo que se ha recurrido a una empresa especializada, instaladora oficial de la empresa de aislamiento *Isover*; y en segundo lugar a la gran repercusión de costes indirectos, producida por la necesidad de instalación de medios auxiliares (plataforma elevadora de tijera en fachadas exteriores y sistema de andamio homologado tipo europeo en fachadas a patio interior) hasta la altura de cuarta planta para ejecutar una única planta de aislamiento de SATE y no en el edificio completo. En la figura 6.76 podemos observar la plataforma elevadora montada al efecto para ejecutar los trabajos en la vivienda 4ºF, en su fachada a la calle Antonio Rengel. En la figura 6.77 podemos observar el sistema de andamio montado al efecto para ejecutar los trabajos en la vivienda 4ºF, en su fachada al patio interior.

Otra técnica novedosa de rehabilitación energética de la envolvente térmica



Figura 6.76. Plataforma elevadora para la ejecución de SATE en fachada a la calle



Figura 6.77. Andamio europeo para la ejecución de SATE en fachada a patio interior



Figura 6.78. Material de insuflado de cámaras. Sistema *Insuver*



Figura 6.79. Inspección de cámara mediante laparoscopia, previa a insuflado de lana mineral

implementada con éxito en este proyecto, ha consistido en insuflar la cámara de aire del cerramiento de la vivienda situada en calle Honduras con nódulos de lana mineral del tipo *Insuver*, de la casa comercial *Isover*. En la figura 6.78 se puede apreciar el material de insuflado y la máquina con la que se realiza la puesta en obra del sistema.

En la figura 6.79 se observa una primera inspección de la cámara mediante sonda laparoscópica para determinar si el estado de la cámara es el adecuado para esta tecnología de rehabilitación específica, así como la matriz de orificios practicada en la hoja exterior del cerramiento (separación aproximada 50 cm) para la inyección del material.

El último de los sistemas de rehabilitación de la envolvente térmica implementados en este



Figura 6.80. Aplicación de pintura termoreflexiva en fachada de vivienda

proyecto, consiste en la aplicación de un sistema SATE de bajo coste formado por pintura cerámica nanoestructurada de naturaleza termoreflexiva. La aplicación de este sistema en poco difiere de la aplicación de una pintura tradicional. Para conseguir la aplicación completa de la pintura en dos capas (previa preparación del soporte con rascado y cepillado de superficie) se coloreó la mitad de la pintura de color ocre, de manera que resultaban evidentes aquellas zonas de cerramiento que todavía no habían sido perfectamente cubiertas de la capa de terminación de color blanco. En la figura 6.80 podemos ver imágenes de la aplicación de este sistema.

6.3.5 Instrumentación desarrollada y procesamiento de datos

Como se ha comentado en el apartado 6.2.5 de este capítulo, se ha desarrollado una instrumentación *hardware/software* específica para este proyecto. La instrumentación es tanto alámbrica como inalámbrica, habiéndose aplicado cada una de ellas en viviendas diferentes.

Teniendo en cuenta las variables que debíamos medir, hemos desarrollado los canales de instrumentación (desde el elemento sensor hasta la disponibilidad de la variable en el computador que aloja el software de procesamiento de datos) siguientes:

- Temperatura.
- Humedad relativa.
- Tensión.
- Corriente.

Los sensores de temperatura y humedad relativa nos permiten monitorizar el grado de confort en las viviendas; en cuanto a los de tensión y corriente, nos permiten monitorizar en la vivienda los consumos (potencia a lo largo del tiempo, esto es, energía), y fuera de ella, en las instalaciones de energía renovable, las producciones.

Todos estos canales de instrumentación están conectados a un sistema de comunicaciones que también ha sido desarrollado para el proyecto, el cual permite tener en tiempo real las medidas de las viviendas en los laboratorios

del grupo de investigación que soporta este proyecto.

La vivienda Tres Carabelas 5, 4ºE, ha sido reformada por completo, incluyendo su instalación eléctrica, lo cual ha permitido desarrollar un cableado específico para la instrumentación, y prever las tomas necesarias en sus estancias.

Para la vivienda Tres Carabelas 5, 4ºF, ha habido que desarrollar una instrumentación específica inalámbrica, ya que esta vivienda no ha sido reformada a nivel de instalación eléctrica. No obstante, el concepto de la instrumentación en ambas viviendas es el mismo, con la excepción que la vivienda E está más instrumentada que la F. Esto puede verse en las figuras 6.17 a 6.20 y 6.37 a 6.40. En cualquier caso, la vivienda 4ºF dispone de la instrumentación mínima para realizar una monitorización efectiva de la misma.

Realmente la intención del equipo de investigación ha sido afrontar el problema de instrumentación desde dos puntos de vista prácticos diferentes. En unos casos la rehabilitación de una vivienda podrá conllevar la reforma completa de su instalación eléctrica (caso de la vivienda 4ºE en este proyecto), y en otros no (caso de la vivienda 4ºF en este proyecto), sin embargo en ambos casos interesará tener las viviendas instrumentadas.

6.3.5.1 Canal de instrumentación de temperatura

En la vivienda Tres Carabelas 5, 4ºE, se han instalado dos sensores de temperatura por estancia, con objeto de obtener medida del gradiente térmico vertical de cada uno de los espacios.

En la vivienda 4ºF se ha instalado un solo sensor inalámbrico de temperatura por estancia. La intención última es comprobar la necesidad de tener dos medidas de temperatura en vez de una.

El canal de instrumentación comienza con el sensor de temperatura ubicado en la estancia. Los canales de instrumentación desarrollados son de dos tipos:

6.3.5.1.1 Canal de instrumentación tipo DS18B20

El sensor DS18B20 emplea para su comunicación una única línea (técnicamente esto se conoce como *bus 1-Wire*). Este bus consta de una sola línea de comunicación de datos y las correspondientes de tierra y alimentación.

El hecho de que el sensor emplee un sólo canal de comunicación y de que disponga de un código de 64 bits (firma), facilita enormemente su instalación en una vivienda, ya que de forma simple pueden ser conectados al bus tantos sensores como se precisen. Su firma individualizada permite interrogar cada sensor concreto independientemente del número que haya conectado al mismo bus. Además, al proporcionar el sensor ya de forma directa una salida digital, evita el tener que desarrollar un sistema de acondicionamiento de señales, lo cual, además de encarecer la instalación, le añade complejidad y necesidades de espacio extra.

Las características del DS18B20 son las siguientes:

- Rango de medida de temperatura de -55 a 125 ºC.
- Precisión de ±0.5 ºC en el rango de -10 a 85 ºC.
- Cada sensor es direccionable a través de un código único de 64 bits
- No requiere de componentes externos.
- No requiere de calibración.
- No requiere de acondicionamiento de señal específico.

En la figura 6.81 se muestra el aspecto físico del sensor DS18B20. Éste tiene tres patillas: datos, alimentación y tierra. Para su inserción



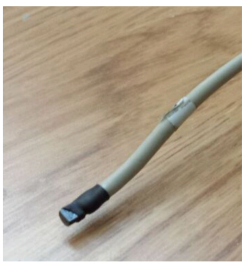


Figura 6.81. Sensor DS18B20. Aspecto físico

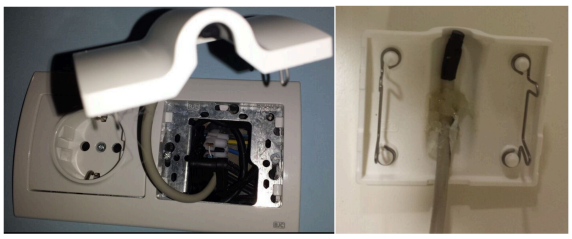


Figura 6.82. Sensor DS18B20. Aspecto instalado

en campo, las patillas del sensor van soldadas a un cable de tres hilos. Cada una de las soldaduras se protege con funda termoretráctil, y después se añade otra funda termoretráctil que cubre todas las patillas del sensor, de modo que éstas no queden al aire.



Figura 6.83. Sensor DS18B20 instalado en el exterior

La medida de temperatura ha sido escamoteada en las viviendas utilizando cajillas que disimulan el sensor dentro una base de enchufe usual. Esto puede verse en la figura 6.82.

El sensor DS18B20 ha sido utilizado también para la medida de temperatura en el exterior. Concretamente, en el exterior de la envolvente de las viviendas 4ºE y 4ºF, y en los paneles fotovoltaicos del sistema de energía renovable

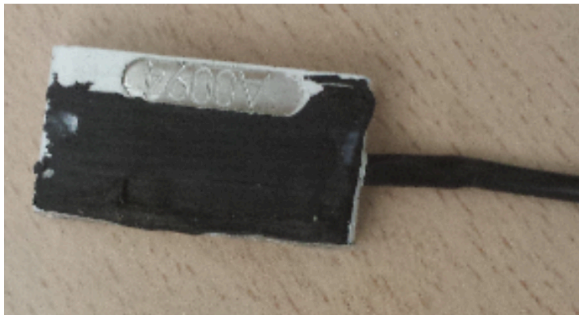


Figura 6.84. Sensor DS18B20 encapsulado para el exterior

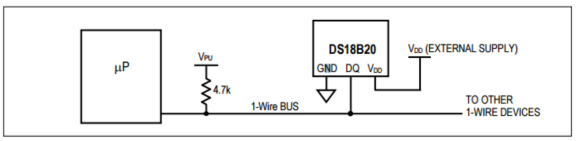


Figura 6.85. Esquema de conexión de cada uno de los sensores de temperatura DS18B20

de ambas viviendas ubicado en la cubierta del edificio (14 sensores, 8 en la instalación 4ºE y 6 en la 4ºF). Esto puede verse en la figura 6.83. También como medida externa, aunque están ubicados en un alojamiento estanco, podemos citar los 4 sensores que miden la temperatura de las baterías (ver figura 6.26).

Para la medida de temperatura en el exterior ha sido necesario acondicionar debidamente los sensores DS18B20. En concreto, el sensor ha sido alojado en una vaina de aluminio anodizado. Internamente se ha añadido silicona térmica, con objeto de incrementar la conducción de calor entre el sensor y la vaina de aluminio. Por último, se ha utilizado un sellador elástico de poliuretano de altas prestaciones, para cubrir completamente el sensor, de modo que su exposición continua a las condiciones ambientales externas, no cause daño alguno en su electrónica.

En la figura 6.85 se muestra la configuración del sensor DS18B20 para su ubicación en exteriores, y en la figura 6.84, su colocación



Figura 6.86. Exterior del cajillo de interconexión del bus que conecta los sensores de temperatura

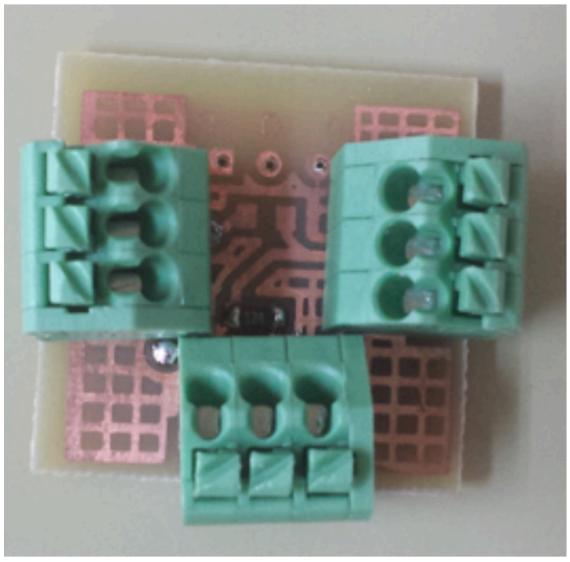


Figura 6.87. Interior del cajillo de interconexión del bus que conecta los sensores de temperatura

para medir la temperatura superficial de los paneles fotovoltaicos.

Como se puede observar en la figura 6.83, la medida superficial de temperatura en los paneles se realiza por su parte de atrás, tal y como exige la norma de aplicación al efecto (IEC61724 e IEC60891). Cada sensor se fija al panel mediante un adhesivo bicomponente *epoxi*, además de silicona térmica para aumentar la transmisión de calor entre panel y sensor.

Cada sensor se conecta al canal de instrumentación que termina en un microcontrolador *Arduino*. En la figura 6.85 se puede ver el esquema de conexión de cada uno de los sensores de temperatura.

En la figura 6.86, se muestra el exterior y en la 6.87 el interior del cajillo de interconexión del bus que conecta los sensores de temperatura.

6.3.5.1.2 Canal de instrumentación tipo DS2438

Como se ha comentado, en cada estancia de las viviendas se realiza, además de la medida de temperatura, una medida de humedad relativa. El sensor de humedad relativa es analógico, y por tanto no admite una conexión como el DS18B20 (figura 6.60). Así pues, con objeto de que todos los sensores vayan conectados en la misma configuración de bus, es necesario desarrollar circuitería adicional.

El DS2438 es un chip que permite la conversión de una señal analógica a bus 1-wire, con la ventaja adicional que tiene imbuido un sensor de temperatura. Esto permite realizar con este chip una doble función: medir la temperatura y transformar la señal analógica de humedad en digital a bus 1-wire. Por tanto, tanto en la vivienda 4ºE (medida de humedad relativa y segunda medida de temperatura), como en la 4ºF (medida de humedad relativa y única medida de temperatura), se ha utilizado el chip DS2438.
A continuación se detallan las características como sensor de temperatura del DS2438, y en la figura 6.88 se muestra el aspecto físico del chip y su conexión en campo.

- Sensor direccionable mediante un código único de 64 bits.
- Rango de temperatura de -55 a 125 ºC.
- Mínima variación de temperatura detectable de 0,03125 ºC.
- No requiere componentes externos.
- No requiere calibración.
- No requiere acondicionamiento de señal específico.

6.3.5.2 Canal de instrumentación de humedad

La medida de humedad relativa se lleva a cabo con el sensor HIH 4000-001, el cual tiene las características siguientes:

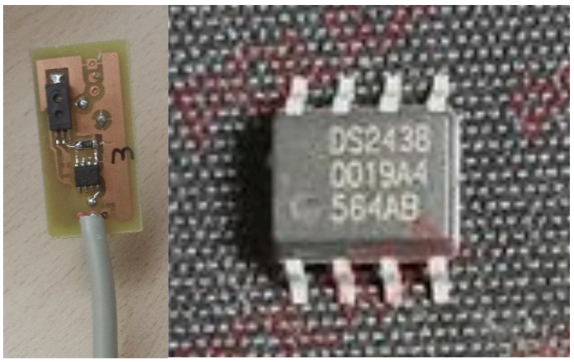


Figura 6.88. Sensor DS2438. Aspecto físico

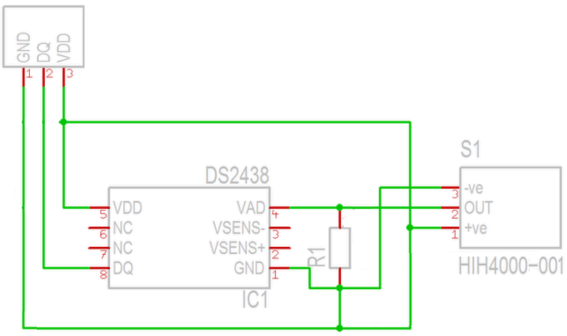


Figura 6.89. Circuito electrónico desarrollado para conectar el sensor de humedad al bus *1-wire*

- Corriente de alimentación: 0.5 mA.
- Rango de humedad: 0% a 100% de humedad relativa.
- Temperatura de trabajo Máx.: 85 °C.
- Temperatura de trabajo Mín.: -40° C.
- Rango de temperatura de trabajo: -40 °C a +85 °C.
- Precisión de detección: 3.5%.
- Tiempo de respuesta: 15 s.
- Salida del sensor: Tensión.
- Sensibilidad: ± 3%.
- Tensión de alimentación del sensor: 4 V CC a 5.8 V CC.

Este sensor proporciona una salida lineal en tensión, en función de la humedad relativa medida, con lo cual su calibración es extremadamente simple. La señal analógica procedente del sensor es acondicionada mediante electrónica desarrollada al efecto, con objeto de cubrir el margen de tensión de entrada del convertidor analógico digital (DS2438), que además de convertir la señal analógica en digital, la adapta a formato *1-wire*, como llevan todos los sensores ubicados en las viviendas. En la figura 6.89 se aprecia el circuito electrónico desarrollado para poder conectar el sensor de humedad al bus *1-wire*.



Figura 6.90. Ejemplo de la colocación del sensor en la pared

En la figura 6.90 puede verse a modo de ejemplo la colocación del sensor en la pared del salón de la vivienda 4ºE.

En la figura 6.91 se muestra la parte trasera de la placa de circuito impreso desarrollada que contiene los conectores para enlazar los diferentes ramales del bus.

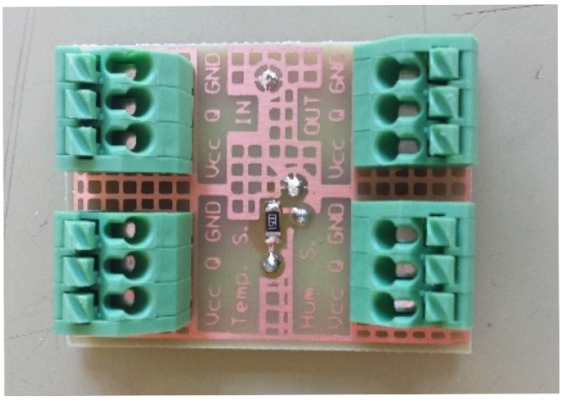


Figura 6.91. Parte trasera de la placa de circuito impreso desarrollada

6.3.5.3 Canal de instrumentación de tensión y corriente

Las variables de tensión y corriente que necesitamos medir hacen referencia a los paneles fotovoltaicos y a las baterías, ambas en continua, y a los consumos de las viviendas, en alterna.

Todas las medidas de tensión y corriente, tanto en continua como en alterna, se realizan mediante sensores de efecto HALL de corriente; lógicamente, cuando se está midiendo tensión necesitamos una resistencia de referencia que permita hacer la conversión corriente-tensión.

6.3.5.3.1 Medición de la tensión

El sensor utilizado es el HVS5-25A, que puede trabajar con una corriente de entrada de hasta 25 A. Proporciona una salida entre 0 y 15 voltios, en función de la tensión de entrada

sensada (corriente a través de una resistencia de referencia).
Las características principales del HVS5-25A son:

- Tensión de alimentación: ± 15 V CC.
- Utilización en corriente continua y corriente alterna.
- Corriente de sensado: 10 mA.
- Corriente de salida nominal RMS: 25 A.
- Precisión: ± 0,5 %.
- Rango de temperatura: -40 +85 ºC.

En la figura 6.92 se muestra el esquema de conexión del sensor HVS5-25A.

Tal como se observa en la figura 6.92, la tensión a monitorizar es VP, con lo cual es necesario colocar una resistencia R1, de forma que IP valga unos 5 mA. Este sensor puede medir tensiones en CC y en CA, lo que hay que tener en cuenta son los valores de VP para cada caso. Para CC, la salida máxima en tensión de los paneles es de unos 37 V, por lo que se ha calculado R1 para un valor de 50 V (10 KΩ, 5W). Es decir, el sensor ofrecerá una salida de entre 0 y 15 V para una entrada comprendida entre 0 y 50 V, o lo que es lo mismo, una sensibilidad de 0,3 V/V. Como la entrada al convertidor analógico-digital del microcontrolador es de 0-5 V, se ha tenido que adaptar la señal a sus requerimientos.

Para el caso de alterna, la entrada es de 230✓2 = 325,26 V. Se ha elegido una señal VP de entrada máxima de 500 V, obteniéndose una resistencia R1 de valor 100 KΩ, 5W. Nuevamente el valor de 0-15 V de la salida ha sido necesario adaptarlo a los valores 0-5 V del convertidor analógico-digital del microcontrolador.

También hay que tener en cuenta, que cuando se miden tensiones alternas, la salida del

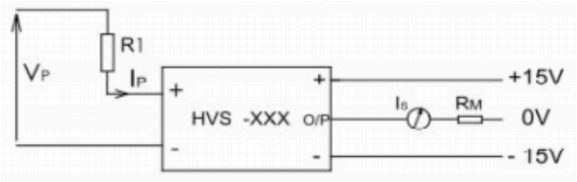


Figura 6.92. Esquema de conexión del sensor HVS5-25A

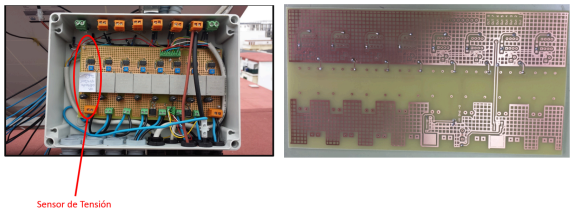


Figura 6.93. Vista de los sensores instalados y detalle de la placa

sensor también es alterna, por lo que ha sido necesario incorporar un circuito de adaptación de señal, tanto de alterna a continua como a los 0-5 V necesarios del convertidor analógico-digital del microcontrolador.

El esquema de la figura 6.92 ha sido utilizado para monitorizar las tensiones de los paneles fotovoltaicos. Los sensores han sido todos agrupados en una misma placa tal y como se muestra en la figura 6.93.

En la figura 6.94 se muestra el circuito construido para la medición de tensión alterna.

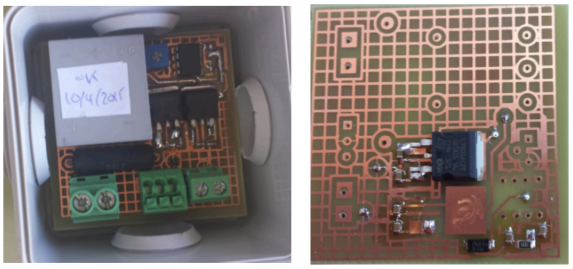


Figura 6.94. Circuito para la medición de tensión alterna

6.3.5.3.2 Medición de la corriente

Para la medida de la corriente, tanto en continua como en alterna, se utiliza el sensor de efecto HALL ACS712, que mide hasta 30 A. Este sensor se comercializa para no necesitar componentes externos, con lo cual es muy cómodo y simple trabajar con él.

Las características principales del sensor ACS712 son:

- Utilización en corriente continua y corriente alterna.
- Tensión de alimentación: 5 V DC.
- Rango de temperaturas: -40 a +85 ºC.

- Sensibilidad: 66 mV/A.
- Corriente de sensado: -30 a +30 A.

Para corrientes de hasta 30 A se ha empleado el sensor ACS712. En la figura 6.95 se muestra el esquema y el circuito impreso realizado.

6.3.5.4 Canal de instrumentación inalámbrico de temperatura y humedad

Como ya se ha mencionado, en la vivienda 4ºE no se ha realizado cambio de su instalación eléctrica, con lo cual tampoco se ha implementado un cableado específico para instrumentarla. Consecuentemente, ha habido que desarrollar una instrumentación inalámbrica para la monitorización de la temperatura y humedad en todas las estancias de la casa, tal y como se muestra en la figura 6.38.



Figura 6.95. Esquema y sensor ACS712

Las medidas inalámbricas de temperatura y humedad se han realizado mediante el sensor SHT21. El funcionamiento de este sensor está basado en una variación de su capacidad como consecuencia de la variación del dieléctrico. La humedad ambiente modifica el dieléctrico y, como consecuencia, la capacidad del sensor. Éste necesita de un circuito de acondicionamiento y procesado de señal para poder llevar la medida al sistema de control de comunicaciones de la vivienda.

Las características principales de este sensor son:

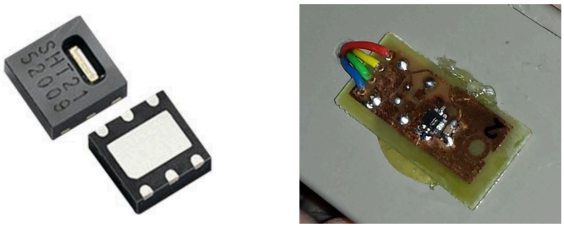


Figura 6.96. Sensor SHT21. Aspecto físico

- Resolución: 12 bits en humedad relativa y 14 bits en temperatura.
- Precisión: ± 2% en humedad relativa y ± 0,3% en temperatura.
- No requiere componentes externos.
- No requiere calibración.
- Baja deriva térmica.



Figura 6.97. Tarjeta NRF24L01. Aspecto físico

En la figura 6.96 se muestra el aspecto físico del sensor y la placa de circuito impreso en la que va alojado junto al cableado.

Cada placa mostrada en la figura 6.96 conforma un punto de medida de temperatura y humedad que, para hacerlo inalámbrico, utiliza una tarjeta de comunicaciones basada en radiofrecuencia. En concreto la NRF24L01, la cual se muestra en la figura 6.97.

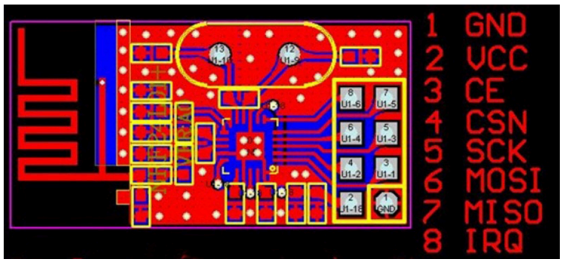


Figura 6.98. Conexionado bus SPI

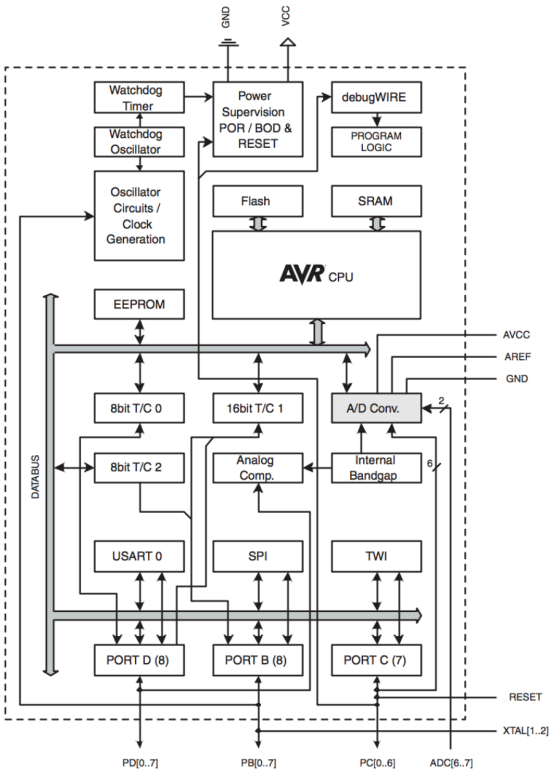


Figura 6.99. Microcontrolador ATMEGA328. Arquitectura

Las características principales de esta tarjeta son las siguientes:

- Bajo coste.
- Banda de operación de 2.4 GHz.
- Velocidad de 1 Mbps o 2 Mbps.
- Bajo consumo.
- No requiere electrónica adicional.

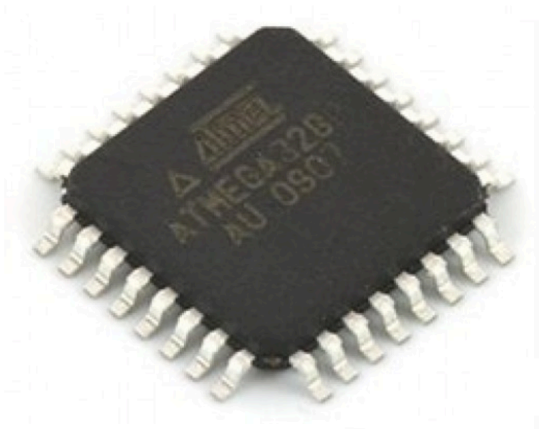


Figura 6.100. Microcontrolador ATMEGA328. Aspecto físico

Los puntos de medida se comunican unos con otros generando una red de comunicaciones. Cada uno de ellos actúa como un periférico del microcontrolador que gobierna el sistema de comunicaciones dentro de la vivienda. La comunicación entre cada punto de medida y el microcontrolador se efectúa mediante el bus SPI, cuyo conexionado se muestra en la figura 6.98.

El microcontrolador que gestiona todas las comunicaciones procedentes de los sensores es un ATMEGA328, instalado en una placa de *Arduino*. La arquitectura del microcontrolador se muestra en la figura 6.99, y su aspecto físico en la 6.100.

Respecto a las características de interés para esta aplicación, son las siguientes:

- Pines SDA y SDL para la comunicación I2C.
- Tensión de alimentación de 7 a 12 V.
- Memoria de 32 Kb.
- Comunicación serie para programación.
- Soporta bus de comunicaciones SPI por software.
- Tamaño reducido.
- Bajo coste.
- Bajo consumo.

Toda la electrónica, incluido el sensor de cada punto de medida, ha sido dispuesto, para su fácil uso, en una caja cuasi estanca que permite la conexión directa a cualquier enchufe estándar de la vivienda. Para ello se incluye también en la caja una fuente de alimentación de diseño específico que, a partir de la tensión de red (220 V AC), genera las tensiones de alimentación de corriente continua necesarias para la electrónica de cada punto de medida. En la figura 6.101 se muestra el dispositivo de medida inalámbrica de humedad y temperatura desarrollado.

Nótese en la figura 6.101, la antena a la izquierda, para permitir las comunicaciones inalámbricas; el macho de enchufe estándar, en la tapa superior, para su conexión a una base de la vivienda; y en la parte inferior, el pasacable con el pequeño circuito impreso que aloja el sensor para su ubicación en el exterior.



Figura 6.101. Dispositivo de medida inalámbrica de humedad y temperatura desarrollado

6.3.5.5 Canal de instrumentación de los sistemas de energías renovables

En la cubierta del edificio situado en Tres Carabelas núm. 5, se han desarrollado dos instalaciones de energía renovable, una que abastece a la vivienda 4ºE (ver figuras 6.18 y 6.21), y otra que abastece a la vivienda 4ºF (ver figuras 6.20 y 6.43).

Respecto a la vivienda 4ºE, dotada exclusivamente de instalación fotovoltaica, sus elementos principales son (ver figura 6.18):

- 8 paneles fotovoltaicos.
- Cuadro general de protecciones.
- Inversor.
- Derivador de energía excedente.
- Resistencia disipadora.

Excepto los módulos fotovoltaicos y la resistencia disipadora, todos los elementos citados se alojan en un armario estanco ubicado en cubierta, el cual se muestra en la figura 6.22.

Siguiendo el esquema de la figura 6.18, los paneles fotovoltaicos van conectados al cuadro general de protecciones antes de pasar por el inversor. Cuando la vivienda no consume toda la energía renovable disponible, el derivador entrega la sobrante a la resistencia disipadora que se encuentra a la intemperie. En la figura 6.102 se muestra a la izquierda el anclaje de la resistencia disipadora, y a la derecha la resistencia ya anclada.

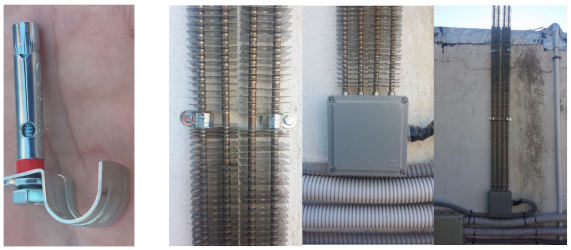


Figura 6.102. Anclaje de la resistencia disipadora y resistencia ya anclada

Respecto a la vivienda 4ºF, dotada de instalación fotovoltaica y eólica, sus elementos principales son (ver figura 6.20):

- 6 paneles fotovoltaicos.
- Aerogenerador.
- Cuadro general de protecciones.
- Inversor.
- Banco de baterías.

En la figura 6.27 se muestra el armario donde se ubican las instalaciones de renovables correspondientes a la vivienda 4ºF, exceptuando los paneles fotovoltaicos y el aerogenerador (ver figuras 6.24 y 6.25), y el banco de baterías (ver figura 6.26).

6.3.5.6 Sistema de comunicaciones

En la figura 6.23, se muestra uno de los ramales del sistema de comunicaciones que permite controlar internamente todas las variables medidas en las viviendas 4ºE y 4ºF, tanto alámbricas como inalámbricas. Dicho sistema es también el encargado de conectar a través de internet las dos viviendas con los laboratorios del Grupo de investigación que ha desarrollado este proyecto, de modo que se puedan tener en tiempo real todas las variables de las viviendas.

El sistema de comunicaciones se configura en base a un maestro ubicado en la vivienda 4ºE (ver figura 6.41), y una serie de esclavos, cuatro en total, distribuidos en las viviendas y la planta de cubierta (con objeto de atender las instalaciones respectivas de energía renovable).

La configuración completa del sistema de comunicaciones es la siguiente: un maestro ubicado en la vivienda 4ºE (figura 6.41), con dos niveles de comunicación, uno hacia el exterior para enviar a internet las variables que son monitorizadas en las dos viviendas, y otro hacia el interior para controlar las comunicaciones de

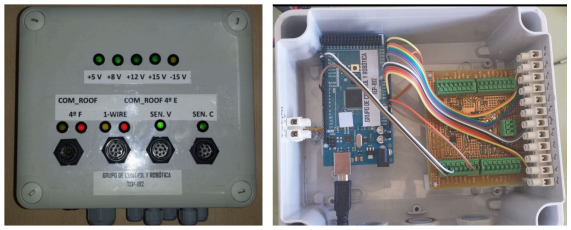


Figura 6.103. Esclavo de comunicaciones correspondiente a la instalación renovable de la vivienda 4ºE

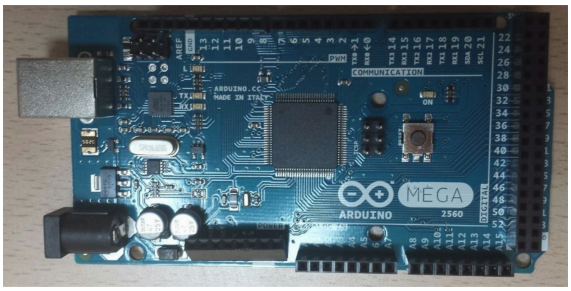


Figura 6.104. Microcontrolador un *Arduino* MEGA2560. Aspecto físico

los esclavos que reciben todas las señales de interés. Existen dos esclavos en la vivienda 4ºE (uno que atiende a las variables interiores de la vivienda y otro correspondiente a las de su instalación de energías renovables), y otros dos con el mismo cometido en la vivienda 4ºF. En total hay pues cinco dispositivos de comunicaciones, desarrollados en el proyecto y ubicados en cajas específicas. Como ejemplo se muestra en la figura 6.103 el esclavo de comunicaciones correspondiente a la instalación renovable de la vivienda 4ºE (otro análogo tiene la 4ºF). En la foto de la izquierda pueden verse los diodos LED que indican que cada canal de instrumentación tiene la tensión correcta. También se observan los conectores de cada bus, los cuales están realizados con terminales redondos de 8 vías IP67, que garantizan un correcto funcionamiento bajo condiciones climatológicas adversas. Nótese también en la foto de la derecha la placa de circuito impreso (color azul) del microcontrolador encargado de adquirir todas las variables (temperatura, tensión, corriente, potencia, energía) de los paneles solares, así como del consumo desde el inversor. En concreto, se ha empleado como microcontrolador un *Arduino* MEGA2560, el cual se muestra en la figura 6.104.

Para la fabricación de cada caja de comunicación esclavo, se han utilizado reguladores de tensión 7805, los cuales permiten obtener una tensión estable de 5 V para alimentar los sensores de corriente del canal de instrumentación de tensión y corriente. Además, para las comunicaciones de variables genéricas (irradiancia solar, velocidad y dirección del viento) se han utilizado transceivers MAX3080 (piranómetro para medir irradiancia solar) y MAX485 para el resto de variables.

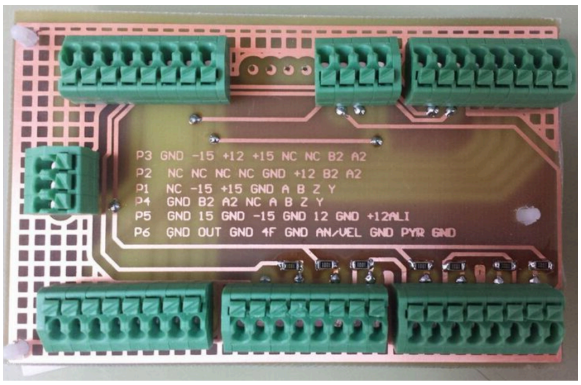


Figura 6.105. *Path-panel* desarrollado

En la figura 6.23, además de los sistemas ya descritos, se observa la existencia de un path-panel que sirve para llevar las alimentaciones de +15 y -15 V, +12 V y todas las comunicaciones RS485 a dos y cuatro hilos que hay en la cubierta, a los dos esclavos, que hay en la cubierta (en la figura 6.23 se muestra el de la vivienda 4ºE). En la figura 6.105 se muestra el *path-panel* desarrollado.

6.4 DISCUSIÓN

A continuación vamos a realizar un desglose de resultados del Proyecto de investigación, manteniendo por coherencia la misma división de apartados seguida hasta ahora. Estos resultados tienen por objeto poner de manifiesto las enseñanzas emanadas del proyecto, y dar lugar a una propuesta de ejecución de rehabilitación que pueda servir de guía a la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía para poder evaluar técnica y económicamente las acciones a llevar a cabo para, a partir del parque de viviendas edificadas a día de hoy, conseguir el cumplimiento en nuestra comunidad autónoma del objetivo 20/20/20 fijado por la unión europea en su directiva 2012/27/UE.

6.4.1 Estudio urbano de las ocho capitales andaluzas

Los núcleos de desarrollismo urbano en las ocho capitales andaluzas, correspondientes a las décadas de los 50, 60 y 70, se han seleccionado en base a los criterios siguientes:

- Crecimientos tipológicamente homogéneos, superiores a 40 viviendas.
- Descartar crecimientos que hayan sufrido rehabilitaciones posteriores a la década de los 70.
- Descartar crecimientos que no se correspondan con núcleos residenciales. Esto es, colegios, hospitales, otro tipo de centros públicos; así como oficinas y otros usos privados.

Los resultados muestran que los núcleos de desarrollismo urbano no son homogéneos para las ocho capitales andaluzas, ya que la evolución natural de las ciudades ha estado muy ligada a una dinámica propia y específica que está sujeta a diferentes casuísticas dependiendo de la capital en cuestión. Por tanto, no es comparable, en general, la evolución de una capital con respecto a otra.

Lo anterior es también de aplicación a la propia densidad constructiva propia de las diferentes capitales. Si bien, hay una característica bastante común a todas ellas, y es que en la década de los 50, y menos quizás pero también acusada en la de los 60, surgieron muchas construcciones de viviendas unifamiliares.

Las construcciones, fundamentalmente de la década de los 50, caracterizadas por viviendas individuales, no presentan en muchos casos una morfología común, lo cual invita a un tratamiento singular.

Hay una gran diseminación de construcciones, fundamentalmente de la década de los 50, que si bien sumadas pueden presentar un relativamente elevado número de viviendas, su análisis a nivel individual o por agrupamientos tipológicamente homogéneos, representa crecimientos pequeños y pocos significativos.

En general, los crecimientos por décadas se corresponden con la evolución natural de las capitales de provincia andaluzas, y el número de crecimientos encontrados está bastante correlacionado con el tamaño que ha ido adquiriendo las ciudades.

El análisis realizado por número de viviendas en un crecimiento (>40), es una forma de graduar la importancia del mismo, si bien una capilarización exhaustiva que llegue a nivel de vivienda individual permitiría conocer de forma exacta el número de viviendas que, sin tener en cuenta agrupación alguna, se corresponde con el año de construcción.

Salvo en Huelva, en el resto de capitales andaluzas, el análisis se ha realizado a nivel de agrupaciones de viviendas. Esto implica que, independientemente de consideraciones generales que por término medio pueden corresponderse con las tipologías de las viviendas, no hay un conocimiento individualizado de las mismas. Consecuentemente, en la mayoría de los casos debe entenderse que hablamos de valores medios y nunca de casuísticas específicas para una vivienda concreta.

La elaboración de una ficha de la vivienda implica un trabajo de campo que requiere la obtención del permiso del propietario para la visita, la realización de ésta y el levantamiento

de planos. Debido al alcance de la investigación y sus objetivos, esta tarea sólo ha podido ser realizada en la ciudad de Huelva.

Hay una serie de medidas que aconsejan un tratamiento individualizado sobre la vivienda que se vaya a rehabilitar. En concreto nos referimos a: la transmitancia de la envolvente (U), la radiación térmica de la misma y sus puntos singulares (ventanas, cajas de persianas, emparchados de forjado, etc.), así como la estanqueidad.

Abundando en el punto anterior, y teniendo en cuenta por un lado la climatología andaluza, y por otro los requerimientos de gradientes térmicos de las medidas de transmitancia y radiación térmica, es muy aconsejable que las campañas de estas medidas se lleven a cabo en épocas del año donde el gradiente térmico interior/exterior de la envolvente sea muy acusado. Esto es, crudo invierno con calefacción interior o crudo verano con refrigeración interior.

Con carácter general, se ha detectado que los puentes térmicos más comunes en la envolvente del edificio se sitúan en el frente de forjados, cajas de persianas, emparchados de pilares, zonas próximas a carpinterías (fijaciones de premarcos), carpinterías propiamente dichas y demás puntos singulares del cerramiento; independientemente de la tipología y década de vivienda estudiada.

La tecnología comercial disponible para la medida de la transmisividad térmica de la envolvente es muy tediosa, tanto en su aplicabilidad como en el tiempo necesario para realizar la medida. Por término medio y en buenas condiciones de gradiente térmico (difíciles de conseguir a lo largo del año en Andalucía), se requieren al menos 24 horas de toma continua de datos para realizar una medida fiable de transmitancia.

Existe una intervención relativamente sencilla y barata para mejorar la estanqueidad a infiltraciones de aire de una vivienda. En una primera fase existen “fugas” fácilmente detectables a simple vista, las cuales pueden ser selladas utilizando siliconas, burletes y otro tipo de sellantes; en una segunda fase más profesional y costosa, aunque siempre en unos límites razonables, se pueden aplicar test de estanqueidad profesionales (como el BDT, por ejemplo), para detectar todo tipo de infiltraciones cuyo sellado permitan un alto nivel de estanqueidad en la vivienda (en torno a los 1 h^{-1}).

Respecto a las carpinterías estudiadas, hay una evidencia que hemos constatado, la cual hace referencia a los cierres tipo corredera. En general, este tipo de cierres no son aptos para conseguir una buena estanqueidad, y en particular sólo serían admisibles, con un cierto grado de permisividad, aquellos de calidad contrastada y de última generación, que en ningún caso coinciden con los existentes en las viviendas analizadas en las décadas correspondientes a este proyecto. Consecuentemente, se impone de entrada, un cambio de cualquier tipo de carpintería tipo corredera por uno de tipo practicable u oscilobatiente.

6.4.2 Sistema de información geográfica (SIG)

Los datos a aportar al SIG requieren de un análisis y conocimiento pormenorizado. Por ello, se ha atendido a la información aportada por las Gerencias de urbanismo de las ocho capitales andaluzas.

Complementando lo anterior, ha sido también muy útil la información aportada por los distintos colegios de arquitectos de las ocho capitales andaluzas.

La documentación obtenida en los puntos anteriores, junto a la disponible en las bases de datos catastrales de las ocho capitales andaluzas, ha constituido la base fundamental que configura la información soportada por el GIS del proyecto.

La selección de polígonos que configuran los crecimientos ha sido una tarea que ha conllevado una toma de decisión basada fundamentalmente en el número de viviendas contenidas.

El punto anterior ha sido complementado con datos catastrales y fotografías procedentes del

Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Esto implica la necesidad de conjugar información alfanumérica y vectorial, teniendo siempre en cuenta como guía la referencia catastral.

Si en la georreferenciación se sigue siempre como elemento vertebrador la referencia catastral, como se ha hecho en este proyecto, los resultados tienen una aplicabilidad inmediata por la administración, así como un fácil uso por proyectos posteriores. Siempre siguiendo el principio de homogeneización de datos y de formatos con los que tienen uso los diferentes estamentos de la administración pública.

Independientemente de que los datos sean entendibles por las aplicaciones catastrales que de modo habitual usa la administración, hay que tener en cuenta que cuando se usan datos catastrales para la búsqueda de información en proyectos del tipo que se presenta, éstos no son homogéneos en el sentido que cada ciudad puede tener un contenido/nivel de datos diferente. Consecuentemente, se requiere de un análisis a fondo de los datos catastrales para poder proporcionar una homogeneización de información a nivel de toda la comunidad autónoma andaluza.

Hay dos valores muy importantes para los análisis requeridos en este proyecto que precisan de un procesamiento minucioso de la información procedente del catastro. En concreto se trata de la información relacionada con la altura de la edificación y el número individualizado de viviendas. En concreto, para la altura utilizamos el valor máximo de número de plantas registrado por catastro en cada parcela. En lo que respecta a las viviendas individuales, hemos de realizar un filtrado de la información alfanumérica proporcionado por catastro de modo que se eliminen códigos como oficinas, garajes, etc.; esto es, cualquier uso diferente al residencial.

Otro filtro importante a realizar respecto de la información suministrada por catastro, es la discriminación de reformas/rehabilitaciones de gran calado (integrales) realizadas en décadas posteriores a la que resulta objeto de análisis, ya que estos crecimientos no son fiel reflejo de la primigenia época constructiva.

Hay muchos crecimientos compactos correspondientes a las décadas analizadas en este proyecto que, después de un minucioso análisis catastral, demuestran no ser de tipo residencial. Por tanto, estos crecimientos han de ser desestimados del proyecto.

Hay ocasiones en las que los crecimientos requieren de un estudio en conjunto. Esto es, se puede dar el caso que la división catastral no origine un número de viviendas que aconseje su consideración, pero la agrupación de viviendas catastralmente diferentes pero de tipología homogénea, aconseje su análisis de forma conjunta.

6.4.3 Simulaciones energéticas

La simulación energética es muy dependiente de una buena entrada de datos, de modo que si éstos no están o son erróneos, los resultados de simulación no son aceptables. Por tanto, aunque pueda parecer paradójico, en este caso la simulación energética depende mucho de medidas y consideraciones realistas provenientes de un buen trabajo de campo. Sólo así, empleando una herramienta profesional, como ha sido el caso de este proyecto, los resultados de simulación pueden tener una sólida base científica y aplicada.

La simulación y sus resultados tienen una gradación altamente dependiente de la información (datos de partida) disponible. Así se puede llegar a un análisis exhaustivo del comportamiento minuto a minuto del medio ambiente interior de la vivienda por estancia, o realizar un análisis previo de la demanda energética basada únicamente en el comportamiento higrotérmico de la envolvente.

Es preciso que, como en este caso, la herramienta de simulación sea profesional, en el sentido más amplio del término, de modo que permita hacer análisis de demanda, estudios de radiación solar, evaluación del nivel de renovación de aire, estudio de cargas térmicas (ocupación, iluminación, calor residual, etc.), etc.

Hemos determinado algo que ya era previsible, y es que la orientación es un factor

determinante en la demanda de energía final del edificio.

Sería conveniente disponer de datos específicos de velocidad y dirección del viento en todas las capitales andaluzas. En nuestro caso, ha habido veces que hemos tenido que buscar dichos datos de forma indirecta, fundamentalmente atendiendo a estaciones meteorológicas de universidades y centros de investigación (datos no integrados en servicios de meteorología centralizados a nivel nacional o andaluz). Esto ha permitido que los datos de simulación para las ocho capitales andaluzas sean fiables.

La decisión de realizar las simulaciones energéticas con el programa *Designbuilder* utilizando como motor de cálculo *Energy Plus* requirió una ardua tarea de investigación. En principio, parecería lógico haber utilizado otros programas reconocidos por el CTE, (probablemente *Herramienta Unificada Lider Calener* sea el ejemplo típico). Sin embargo, este programa y otros del mismo tipo no cubrían los requerimientos de este proyecto, ya que, entre otras deficiencias, las curvas de perfil de usuario no se pueden personalizar, adaptándolas al perfil real de ocupación de la vivienda que se pretende simular. Otro tanto ocurre con las condiciones metabólicas de los ocupantes, las consignas de humedad relativa y temperatura de aire de ventilación, etc.

Hemos utilizado el programa *Designbuilder* utilizando como motor de cálculo *Energy Plus*, porque permite personalizar la plantilla de actividad, la plantilla de ocupación, las condiciones metabólicas, la demanda de ACS, las consignas de temperatura del aire interior, de humedad relativa, de temperatura de ventilación, la tasa de infiltración de aire exterior, los sistemas y equipos de la vivienda, la plantilla de iluminación natural y artificial, los sistemas de acondicionamiento frío/calor, etc.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Almería	13°	13°	15°	16°	19°	23°	26°	26°	24°	20°	16°	14°
Cádiz	11°	12°	14°	15°	18°	22°	26°	26°	24°	19°	15°	12°
Córdoba	9°	11°	14°	15°	19°	24°	27°	27°	24°	19°	13°	10°
Granada	7°	9°	11°	13°	17°	21°	25°	25°	21°	16°	11°	8°
Huelva	11°	13°	15°	16°	19°	22°	25°	26°	24°	19°	15°	13°
Jaén	8°	10°	13°	15°	19°	25°	28°	27°	23°	18°	12°	9°
Málaga	12°	13°	14°	16°	19°	22°	25°	25°	23°	19°	15°	13°
Sevilla	11°	12°	15°	16°	20°	24°	27°	27°	25°	20°	15°	12°

Figura 6.106. Tabla de temperaturas medias de cada una de las provincias

Hemos utilizado el programa *Designbuilder* utilizando como motor de cálculo *Energy Plus*, porque proporciona una información completa, útil para la toma de decisiones orientada a la optimización de la rehabilitación energética a practicar en la vivienda. En concreto, el programa aporta reportes en relación a temperatura del aire, temperatura operativa, temperatura radiante, temperatura exterior de bulbo seco, humedad relativa, horas de disconfort con todo tipo de ropa, ganancias internas de todo tipo (iluminación general, computadoras, equipos, ocupación, ganancias solares por huecos exteriores, calentamientos y enfriamientos sensibles de zona y cargas latentes), consumo de combustible estimado por cargas (electricidad, iluminación, calefacción, refrigeración), emisiones de CO_2 por meses, y diarias, etc.

Los resultados de simulación muestran que, de las ocho capitales andaluzas, cuatro presentan la mayor demanda energética en requerimientos de calefacción (Córdoba, Granada, Cádiz y Jaén), con diferente grado cada una; y otras cuatro presentan la mayor demanda energética en requerimientos de refrigeración (Huelva, Sevilla, Málaga y Almería). Esto se explica fácilmente teniendo en cuenta la tabla de temperaturas medias de cada una de las provincias que se muestra en la figura 6.106, y los requerimientos de confort solicitados al programa de simulación: según el CTE, documento DB-HE en su apéndice C, por debajo de 18 ºC la consigna de calefacción y por encima de 25 °C la consigna de refrigeración.

6.4.4 Actuaciones de eficiencia y rehabilitación energética

Cualquier actuación de rehabilitación integral individual de viviendas para la mejora de la eficiencia energética deberá contar con el apoyo de los vecinos del resto del bloque y de bloques colindantes. Se hace por tanto imprescindible actuar no sólo a nivel técnico, sino mediante intervención social y mediación especializada, dado que no siempre resulta posible negociar

en base a argumentos técnicos con vecinos y comuneros. Esta mediación previa nos evitará molestias durante la ejecución de obra para ambas partes, permitiendo el normal desarrollo de los trabajos.

No es factible eliminar por completo todos los puentes térmicos en la rehabilitación de la envolvente de una vivienda si se actúa únicamente por el exterior, ya que en ese caso el hecho de no aislar bajo solería ni bajo techo permite el flujo de calor con las viviendas de planta inferior y superior, viviendas que con mucha probabilidad, tratándose de barriadas sociales de los años que ocupan este estudio, se encontrarán en estado de pobreza energética, esto es, en condiciones muy similares a espacio interior no calefactado. En el caso de viviendas desocupadas, el problema se agrava, por cuanto sus condiciones de aire interior serían entonces similares a las del aire exterior.

La intervención practicada en Tres Carabelas 5, 4ºE y 4ºF, ha permitido estudiar dos viviendas características de los años 70 en Huelva, si bien como consecuencia de no haber actuado en todo el edificio completo, se han visto incrementados los costes indirectos derivados del montaje y desmontaje de andamios y medios auxiliares para la colocación del SATE en fachada exterior (teniendo que llegar desde el suelo a una planta cuarta para la colocación de sólo unos pocos metros de fachada), encareciendo llamativamente esta partida de obra.

A partir de lo expuesto en el párrafo anterior, la escala óptima de rehabilitación energética es la de edificio completo; pues de esta manera será factible la eliminación total de los puentes existentes, salvo en la mayoría de los casos aquellos dispuestos en el forjado de planta baja entre éste y el terreno.

El cualquier caso el sistema de aislamiento por el exterior de la fachada (SATE) resulta el más adecuado para minimizar los puentes térmicos en la rehabilitación de edificios.

El sistema de rehabilitación energética practicado en la vivienda de calle Honduras, consistente en insuflar lana mineral a presión en el interior de la cámara del cerramiento, tiene como principales limitaciones su ineficacia para eliminar los puentes térmicos del cerramiento provocados por discontinuidad en la cámara (emparchado de pilares y cantos de forjados), y la necesidad de que la misma se encuentre limpia y sin obstáculos que dificulten el correcto insuflado del material (rebabas de mortero, escombros, restos de aislamientos desprendidos y en mal estado en el interior de la cámara de aire). Por contra, se trata de un sistema económico y de rápida aplicación en comparación con el SATE. Resulta por tanto un sistema muy adecuado en intervenciones de rehabilitación energética de la envolvente no demasiado ambiciosas, en las que la permanencia de puentes térmicos no genera riesgos graves de acumulación de humedad por condensación y hongos por la diferencia de U con la parte de cerramiento verdaderamente insuflado.

El sistema de rehabilitación energética de la envolvente practicado en plaza de los Columpios, y posteriormente en calle Honduras, consistente en aplicación de pintura termoreflexiva nanoestructurada para la formación de un SATE de bajo coste, no ha podido constatar su efectividad hasta la fecha, ya que las mediciones de transmisividad (valor de U) antes y después de la actuación realizadas no ha arrojado valores concluyentes. Se trataría de un sistema de rehabilitación a priori muy interesante, por su bajo precio de aplicación (equiparable a una pintura) y la posibilidad de eliminar por completo los puentes térmicos con un muy reducido espesor con la ventaja añadida del aspecto estético recién pintado resultante. Ambas características provocan que debamos continuar observando detenidamente el rendimiento efectivo de esta prometedora tecnología, si bien en el estado actual de nuestra investigación no contamos con los argumentos que nos gustaría para hacer una recomendación de aplicación a gran escala.

Independientemente del nivel de ruido real emitido, las instalaciones de aerogenerador eólico en cubierta resultan especialmente sensibles a la oposición de los vecinos, dado que a menudo provocan la alarma por exceso de ruido causado por el dispositivo. En la instalación realizada para el proyecto en Tres

Carabelas 4ºF, se ha dado el caso de que el vecino de la planta 5a (último piso antes de la cubierta) denunció el exceso de ruido supuestamente producido por el dispositivo desde el primer día de ser éste colocado en el mástil, encontrándose frenado el rotor y por tanto sin posibilidad alguna de emitir ni mucho, ni poco ruido en absoluto.

Los sistemas de apoyo a ACS termosolar en base a sistemas de alta eficiencia tipo bomba de calor aire-agua (aerotermo), al ser sistemas por acumulación y no de generación instantánea, deberán ser regulados por una válvula de tres vías con punto de agua fría de red independiente de los captadores termosolares. Esta válvula de tres vías vehiculará el ACS necesario para abastecer el consumo en época de baja radiación solar desde el aerotermo cuando el acumulador solar de las placas solares agote su reserva. En época de alta radiación solar, la opción más conveniente desde el punto de vista de la eficiencia es colocar el aerotermo en modo *off* de manera manual (aproximadamente de Abril a Octubre) o programada.

Para conseguir la adecuada estanqueidad al aire de la vivienda rehabilitada (en torno al valor de 1 h^{-1} en el ensayo del BDT) es necesario sellar la caja de electricidad en el interior de la vivienda, y su conexión con el exterior a través del corrugado que aloja su derivación individual desde el cuadro de contadores. Del mismo modo hay que proceder con el corrugado que aloja el timbre y en general, cualquier conducto de electricidad que comunique el interior con el exterior.

Debido a las aperturas de ventilación permanentes a las que obliga la normativa específica en materia de instalaciones de gas en cocinas, este tipo de instalaciones no resulta adecuado en rehabilitación energética de viviendas, por cuanto van a comprometer absolutamente la posibilidad de hacer estanca la envolvente, ya que lo que buscan es facilitar la renovación de aire como medida de seguridad ante escapes de gas, y con él el flujo de calor a través de las rejillas de ventilación obligadas en el cerramiento de la cocina.

El sistema más adecuado para la ventilación de la vivienda de alta eficiencia es el mecánico de doble flujo con recuperación de calor de alta eficiencia (> 85%), instalado en las viviendas de calle Tres Carabelas en este proyecto. Este sistema permite hacer muy estanca la envolvente de la vivienda, minimizando el flujo de calor por intercambio de aire con el exterior. Sin embargo su instalación es costosa, tanto desde el punto de vista económico como del espacio que consume; por cuanto necesita de un armario dedicado en el interior de la vivienda de dimensiones aproximadas 80x60x200 cm (según marca y modelo), y de reducir la altura libre en el pasillo mediante la instalación de un falso techo, para el tendido de la red de conductos de distribución de aire de ventilación a las diferentes estancias de la vivienda. Se trata por tanto de una instalación muy conveniente, pero que únicamente está justificada cuando se persiguen objetivos de eficiencia energética muy ambiciosos.

Para controlar adecuadamente la pérdida de la calidad del aire interior de la vivienda rehabilitada altamente estanca, deberá dotarse el sistema de ventilación con sondas de CO_2, de modo que la velocidad normal de renovación de aire interior pueda aumentarse cuando la concentración de CO_2 expresado en partes por millón supere el nivel crítico (300-400 ppm). Esto puede ocurrir fácilmente cuando el nivel de ocupación de la vivienda aumente anormalmente (invitados), o cuando la tasa de renovación baje de lo mínimo adecuado en función de la actividad metabólica de los usuarios de la vivienda. Para evitar que en esos casos el aumento de la velocidad del aire en los conductos produzca disconfort por exceso de ruido, se dotará al sistema de ventilación de silenciadores acústicos acoplados al recuperador en la entrada y salida de los conductos de admisión, así como de juntas elásticas y fijaciones antivibración en los conductos de distribución.

No basta con instalar ventanas de altas prestaciones (vidrios dobles o triples, en marcos de PVC aislante o similar). Se hace imprescindible una adecuada instalación de las mismas, de modo que se asegure que éstas se colocan en continuidad con la capa de aislamiento para evitar el puente térmico en las

mochetas (ojo porque si instalamos SATE esto equivale a colocar las ventanas en la cara exterior del cerramiento, dado que la alternativa sería reducir muy apreciablemente el tamaño de los huecos originales doblando el SATE por mochetas, dinteles y alféizares para evitar el puente térmico).

No basta con instalar las nuevas carpinterías en el plano del aislamiento, sino que se hace imprescindible el correcto sellado de su perímetro en su encuentro con la obra gruesa (cerramiento original) para evitar puntos de infiltración de aire y acumulación de hongos en las esquinas de las carpinterías. Para alcanzar adecuadamente el objetivo deseado es necesario disponer de bandas expansivas de sellado, y aplicar siliconas y espumas específicas de altas prestaciones y alta durabilidad (sistema SWS o equivalente).

La tipología de ventanas más adecuada, independiente de sus prestaciones térmicas, es la oscilobatiente (más flexible) o la practicable. Las ventanas correderas, muy habituales en viviendas porque no invaden con su apertura el a menudo muy escaso espacio útil interior disponible en este tipo de viviendas, resultan por su propia naturaleza, muy inadecuadas, por cuanto no son en absoluto estancas al aire y favorecen el flujo de calor interior-exterior por convección en épocas de mucho frío o mucho calor.

En general las cajas de persianas resultan soluciones inadecuadas para la rehabilitación energética de viviendas, por funcionar como puentes térmicos y de infiltración de aire por estar poco o nada aisladas, y por permitir la comunicación del aire del exterior con el interior de la vivienda. En su lugar y como dispositivos de oscurecimiento alternativos más compatibles con la eficiencia energética, proponemos las cortinas de oscurecimiento total por el interior (tipo hotel) o las contraventanas por el exterior, que además presentan la ventaja de proteger del exceso de radiación solar directa en épocas de mucho calor.

6.4.5 Instrumentación desarrollada y procesamiento de datos

La instrumentación *hardware/software* desarrollada, ha resultado ser un gran avance científico/tecnológico del Grupo de investigación, en tanto en cuanto es reproducible para cualquier rehabilitación que se lleve a cabo a partir de la finalización de este proyecto.

La instrumentación desarrollada (hardware y software) es muy versátil en el sentido que permite su aplicación a cualquier rehabilitación, independientemente del grado de ésta. Así, para una rehabilitación integral que implique el cambio de la instalación eléctrica de una vivienda, es de aplicación directa la instrumentación desarrollada para la vivienda Tres Carabelas 4ºE. Sin embargo, si la rehabilitación no implica el cambio o no requiere actuación alguna sobre enfoscados y tabiques, es de aplicación directa la instrumentación desarrollada para la vivienda 4ºF.

Lo explicado en los dos puntos anteriores, es también de aplicación a los sistemas de energías renovables desarrollados para ambas viviendas, los cuales tienen una concepción completamente diferente. En el caso de la vivienda 4ºE, ésta está permanentemente conectada a la red, de modo que sólo demanda de ella la parte de energía que no puede suministrar el sistema fotovoltaico de que dispone. Sin embargo, la vivienda 4ºF funciona como isla en base a su sistema fotovoltaico y microeólico, de modo que a partir de su banco de baterías, que es cargado por estos dos sistemas renovables, la vivienda se alimenta permanentemente de día y de noche. Cuando el sistema renovable no es capaz de suministrar la energía demandada por la vivienda, el sistema conmuta de forma automática y pasa a estar alimentado desde la red. De esta forma se garantiza que en ningún caso, ninguna de las instalaciones de energía renovable viertan energía a la red eléctrica propiedad de la compañía distribuidora, a la cual están conectadas.

El software desarrollado está permitiendo obtener en tiempo real datos de sumo interés de las viviendas instrumentadas (Tres Carabelas

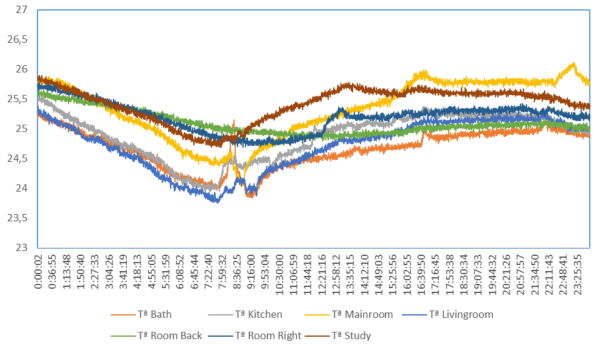


Figura 6.107. Temperatura de diferentes estancias de la vivienda 4ºE el 20 de Mayo de 2015

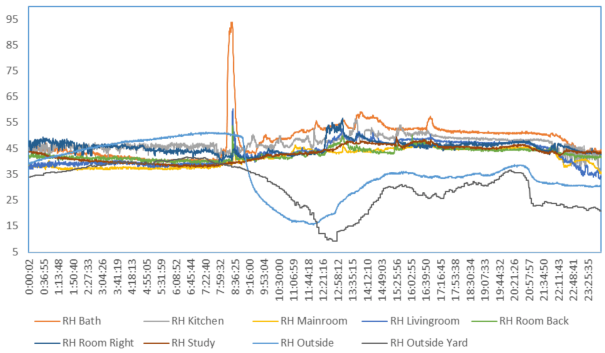


Figura 6.108. Grado de humedad relativa de diferentes estancias de la vivienda 4ºE el 28 de Mayo de 2015

4ºE y 4ºF), ya que disponemos de información del grado de confort de las viviendas (humedad y temperatura exterior; humedad y temperatura en sus estancias interiores; temperatura, irradiancia solar, velocidad y dirección del viento en el exterior de las viviendas; y por último, tanto datos de generación de los sistemas de energía renovable como de consumo de las viviendas).

Al día de hoy, puesto que la instrumentación completa de las dos viviendas (Tres Carabelas 4ºE y F), finalizó a principios del mes de Junio de 2015 (una parte de ella, concretamente la de análisis de temperatura y humedad relativa, estaba ya funcionando desde primeros de Mayo), si bien se dispone ya de una gran cantidad de datos de ambas viviendas, no se tiene aún una serie histórica o temporal concluyente que permita un análisis ligado a la evolución estacional.

Lo anterior implica que el procesamiento de datos y el análisis de los mismos podrá generar en el tiempo (estacionalizando o desestacionalizando los datos), patrones de todo tipo: consumo, generación, pautas de confort específicas por familia, comportamientos en función del grado de ocupación y época del año, etc.).

El volumen de datos que suministra diariamente el sistema de instrumentación desarrollado es enorme. Por poner un ejemplo, en la figura 6.107 se muestra una gráfica de datos que representa la temperatura de diferentes estancias de la vivienda 4ºE el 20 de Mayo de 2015. Ese día, la temperatura mínima en el lugar donde se ubica la vivienda fue de 14,4 ºC, y la máxima de 20,9 ºC. Aplicando los requerimientos de confort según el CTE, documento DB-HE en su apéndice C, por debajo de 18 ºC debe aplicarse calefacción. Sin embargo, nótese cómo la vivienda durante todo el día permanece en una temperatura bastante estable, que oscila entorno a dos grados (24-26 ºC).

Otro dato relevante que se obtiene de las viviendas instrumentadas es el grado de humedad relativa, el cual influye también en el grado de confort. Por poner otro ejemplo, en la figura 6.108 se muestra una gráfica del comportamiento del grado de humedad relativa en la vivienda 4ºE el día 28 de Mayo de 2015. Nótese la variabilidad de la humedad relativa en el exterior de la vivienda comparada con la estabilidad en el interior de la misma. Como caso curioso, se puede observar un pico sobre las 8:30 de la mañana en uno de los baños, lo cual se deba muy probablemente a que uno de los usuarios de la vivienda estaba duchándose.

A modo de comparativa, en las figuras 6.109 y 6.110 se muestran las gráficas de temperatura y humedad relativa para los mismos días en la vivienda 4ºF. Nótese que la diferencia de comportamiento es bastante relevante, ya que no se tiene la estabilidad diaria de la vivienda 4ºF. Ello se debe al diferente grado de rehabilitación practicado en la vivienda 4ºF, ya que en ella no se ha eliminado el puente térmico existente con la vivienda 3ºF (suelo) y 5ºF (techo), como sí se ha hecho en la vivienda 4ºE, donde en ambos casos se ha actuado aislando por completo la envolvente.

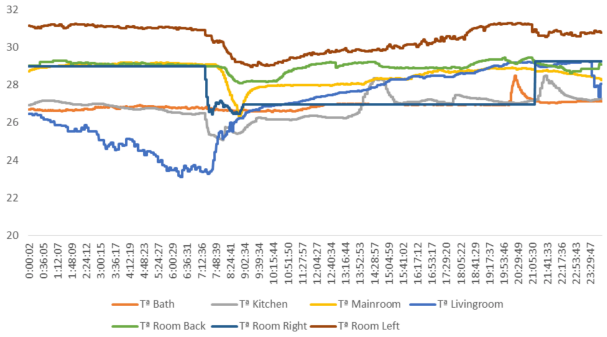


Figura 6.109. Temperatura de diferentes estancias de la vivienda 4ºF el 20 de Mayo de 2015

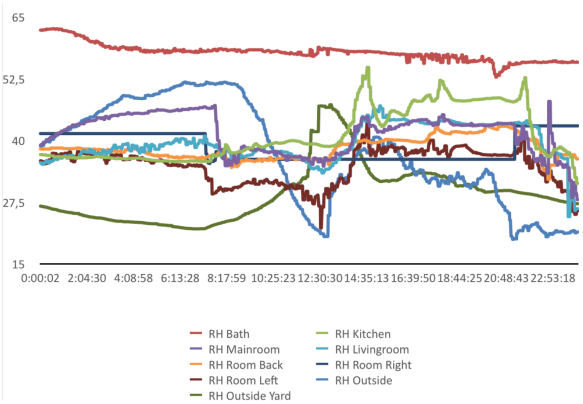


Figura 6.110. Grado de humedad relativa de diferentes estancias de la vivienda 4ºF el 28 de Mayo de 2015

Los datos de producción energética de las instalaciones de energías renovables y de consumo de las viviendas requerirán un análisis a lo largo del tiempo, que permita correlacionarlos con la climatología, la ocupación de la vivienda, el confort, patrones de gasto energético, etc. No obstante, se dispone ya de datos diarios. Así, por ejemplo, en las figuras 6.111 y 6.112 se muestran respectivamente la producción de energías renovables y el consumo realizado en la vivienda 4ºE el día 9 de Julio de 2015.

Observando la figura 6.111, vemos que el patrón de generación del sistema fotovoltaico es absolutamente típico. Esto es, una campana perfectamente simétrica respecto de la hora local de mayor irradiancia solar (en la actualidad dos horas de adelanto con respecto al horario solar, aproximadamente 14:30 en la gráfica). En cuanto a la potencia suministrada por el inversor, éste sigue lógicamente la del panel solar. Ténganse en cuenta que esta curva está demostrando que toda la energía que produce el inversor y que, por tanto consume la vivienda, está siendo generada por el sistema fotovoltaico, ya que si hubiera entradas de la red la campana del inversor no sería análoga a la de los paneles.

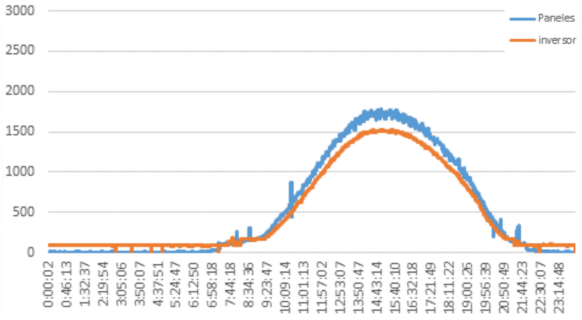


Figura 6.111. Producción de energías renovables en la vivienda 4ºE el día 9 de Julio de 2015

Debido a las características de esta instalación, en horario donde el sistema fotovoltaico no está activo (cuando no hay horas de sol), el consumo es satisfecho por la red eléctrica del usuario. Por último, como en las horas centrales del día el consumo es inferior a la generación, parte de la generación renovable (la no consumida) es disipada en la resistencia externa instalada en la cubierta (ver figura 6.102).

Lo especificado en el punto anterior sugiere que en viviendas con este tipo de instalación, los propietarios deberían ser informados sobre la necesidad de adecuar el perfil de consumo al de generación. Es decir, los mayores consumos (cocinas, lavadoras, friegaplatos, etc.) deberían darse en horarios de mayor producción energética (horas centrales del día). Esto hoy en día está más que resuelto mediante domótica, o simplemente utilizando electrodomésticos programables. Nótese en la figura 6.111 cómo hay un pico de consumo debido al circuito de la lavadora y el friegaplatos. Si en vez de realizarse este consumo a las once de la mañana aproximadamente (ha sido satisfecho por completo con la instalación de energía renovable) se hubiera realizado una hora antes, parte de la energía necesaria hubiera sido suministrada a través de la red de la compañía eléctrica, con lo cual se hubiera penalizado el recibo de consumo eléctrico.

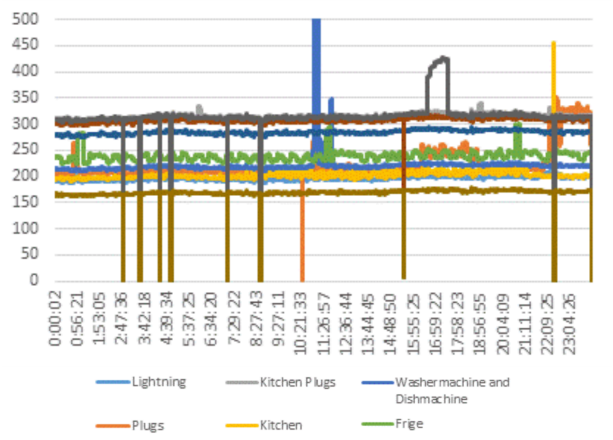


Figura 6.112. Consumo en la vivienda 4ºE el día 9 de Julio de 2015

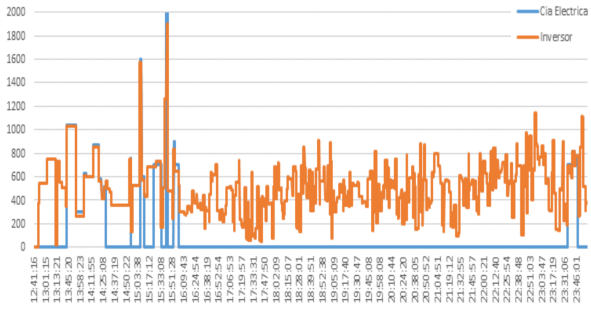


Figura 6.113. Patrón de generación del sistema fotovoltaico en la vivienda 4ºF

La instalación de la vivienda 4ºF tiene una configuración diferente, debido a que puede funcionar como isla mediante su banco de baterías, de modo que está permanentemente tirando de él salvo cuando requiera una demanda superior a la capacidad de suministro, en cuyo caso conmuta a la red eléctrica.

En la figura 6.113 se muestra la generación (y consumo) de la vivienda 4ºF el día 9 de Julio de 2015, mostrando si la demanda puede ser satisfecha o no con la instalación de energía renovable. La curva naranja muestra el consumo a la salida del inversor. En esta vivienda, como no se ha realizado una nueva instalación eléctrica, los circuitos no están selectorizados, con lo cual hemos decidido medir el consumo (consumo total) a la salida del inversor. Para estudiar la generación de la instalación, el cómputo global se hace a la entrada del inversor, por el lado de la compañía eléctrica, es decir, cuando el banco de baterías no es capaz de soportar la demanda de la vivienda. La curva azul indica este caso. Nótese, comparando la figura 6.113 con la 6.112 cómo el patrón de consumo para ambas viviendas en ese día es completamente diferente, lo cual se debe seguramente a que una vivienda estuviese ocupada la mayor parte del día, y la otra no.

En la figura 6.113 se observa que para esta época del año (mes de Julio), la gran disponibilidad de irradiancia solar permite que la mayor parte del día la vivienda estuvo alimentada por su sistema de energía renovable, y por tanto, no hizo apenas uso de la red eléctrica de la compañía distribuidora.

6.4.6 Producción de las instalaciones de energía renovable

A continuación se van a describir las producciones de energía renovable referente a las dos viviendas sitas en la calle Tres Carabelas nº5, 4ºE y F de Huelva, las cuales son las que han sido actuadas a nivel de instalación de energía renovable, tal y como se explica en la sección 5.2.4.3 de este documento.

6.4.6.1 Vivienda 4ºE

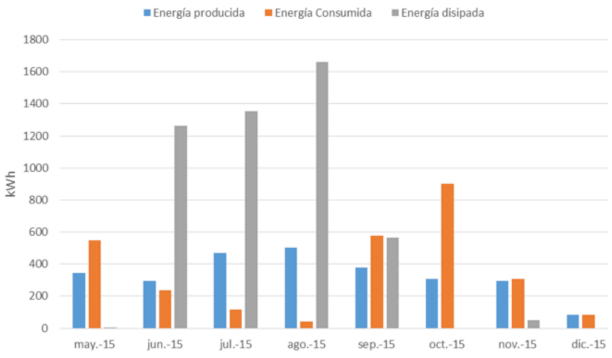


Figura 6.114. Media mensual de energía producida, consumida y disipada de mayo a diciembre de 2015

La vivienda 4ºE es alimentada con una solución que garantiza que conecta a la vivienda toda la potencia de energía renovable disponible. Si sobra potencia, ésta se emplea en calentar una resistencia para no ser vertida a la red de la suministradora (podría tener otro uso en un

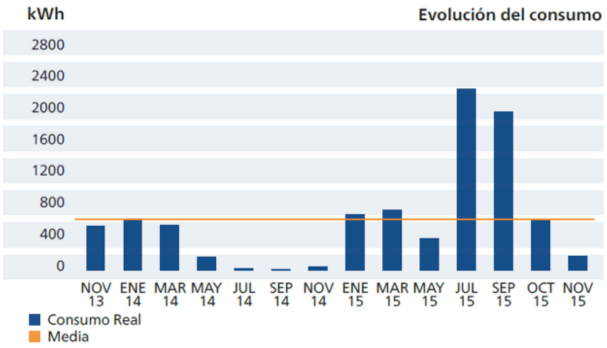


Figura 6.115. Consumo eléctrico suministrado por la compañía distribuidora

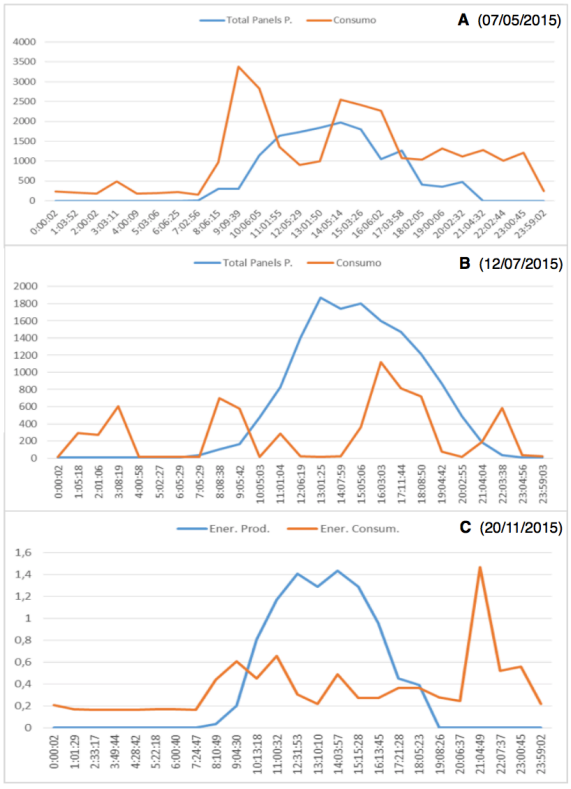


Figura 6.116. Comportamiento energético de la vivienda 4ºE en diferentes días de diferentes meses

futuro, tal como un termo eléctrico o similar), y si falta, ésta es tomada de la red. El conjunto de ocho paneles fotovoltaicos de 250 Wp (2000 Wp), se conecta a un inversor de aplicación específica para este uso cuya salida es de 230 VAC monofásico. Dicho inversor tiene también una entrada de 230 VAC monofásico procedente de la red. El inversor regula que la componente de energía procedente de la instalación fotovoltaica más la de la red satisfaga en todo momento la demanda de la vivienda.

En la Figura 6.114, se muestra la gráfica de la energía real producida y consumida en la instalación desde mayo de 2015, hasta el 12 de diciembre de 2015. En la Figura 6.115, se muestra el consumo eléctrico suministrado por la compañía distribuidora a esta vivienda en el periodo considerado.

Tanto en la zona de continua de la instalación (salida de paneles) como de alterna (salida del inversor hacia la vivienda), se monitorizan tensiones y corrientes, para poder conocer en cada momento la potencia consumida y producida, que es promediada (integrada en el tiempo) para conocer la energía en kWh. La diferencia entre el consumo y la producción, es suministrada por la empresa eléctrica.

A la vista de la figura 6.115 se observa un consumo inesperadamente alto en las facturaciones de Julio y Septiembre, el cual no se corresponde con el régimen de uso de la vivienda, ya que sus inquilinos, durante los meses estivales están de veraneo en otra vivienda. La causa fue motivada por el controlador de energía inyectada a la resistencia disipadora, que se averió y mantuvo conectada a la red de la compañía distribuidora durante todo el tiempo dicha resistencia. Esto provocó un elevado consumo durante esa fecha, ya que la resistencia disipadora es de 2 kW. Lógicamente, cuando se descubrió el fallo éste fue solucionado y el consumo volvió a sus valores normales. Esta gráfica procede de un escaneo de la factura de consumo eléctrico de

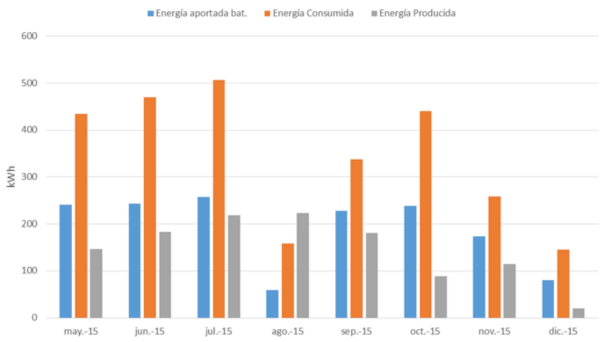


Figura 6.117. Media mensual de energía producida, consumida y disipada de mayo a diciembre de 2015

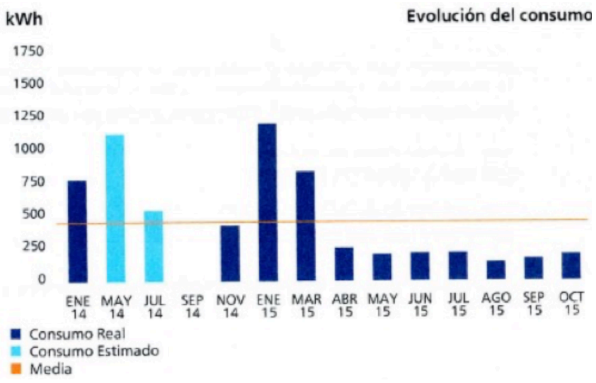


Figura 6.118. Consumo eléctrico suministrado por la compañía distribuidora

la vivienda, proporcionada por la empresa suministradora de electricidad (Ver Anexo 6.7.3).

En la figura 6.116 se muestran como ejemplo varias gráficas sobre el comportamiento energético de esta vivienda en diferentes días de diferentes meses.

6.4.6.2 Vivienda 4ºF

Esta vivienda está conectada a una instalación que funciona de forma casi aislada, esto quiere decir que la generación de los paneles FV, concretamente 6 paneles de 250 Wp, alimentan un banco de baterías (4 baterías solares de 600 Ah). Las cargas de la vivienda están conectadas a estas baterías, de forma que cuando su carga disminuya del valor tarado como crítico, o cuando el consumo puntual sea superior a los 3 kW, el inversor/regulador desconecta a la carga de las baterías y conecta a la vivienda a la red eléctrica de distribución. Esto quiere decir que la vivienda, está alimentada bien de su propia red de energía renovable (isla) o de la red de distribución, pero nunca de ambas.

Tanto en la zona de continua de la instalación (salida de paneles y del banco de baterías) como de alterna (salida del inversor hacia la vivienda), se monitorizan tensiones y corrientes, para poder conocer en cada momento la potencia consumida y producida, que es promediada (integrada en el tiempo) para conocer la energía en kWh. Cuando la instalación renovable no puede soportar el consumo exigido, el controlador desconecta ésta y conmuta a la red de distribución eléctrica.

En la Figura 6.117, se muestra la gráfica de la energía real producida y consumida en la instalación desde mayo de 2015, hasta el 12 de diciembre de 2015.

En la Figura 6.118, se muestra el consumo eléctrico suministrado por la compañía distribuidora a octubre de 2015. Esta gráfica procede de un escaneo de la factura de consumo eléctrico de la vivienda, proporcionada por la empresa suministradora de electricidad (Ver Anexo 6.7.3).

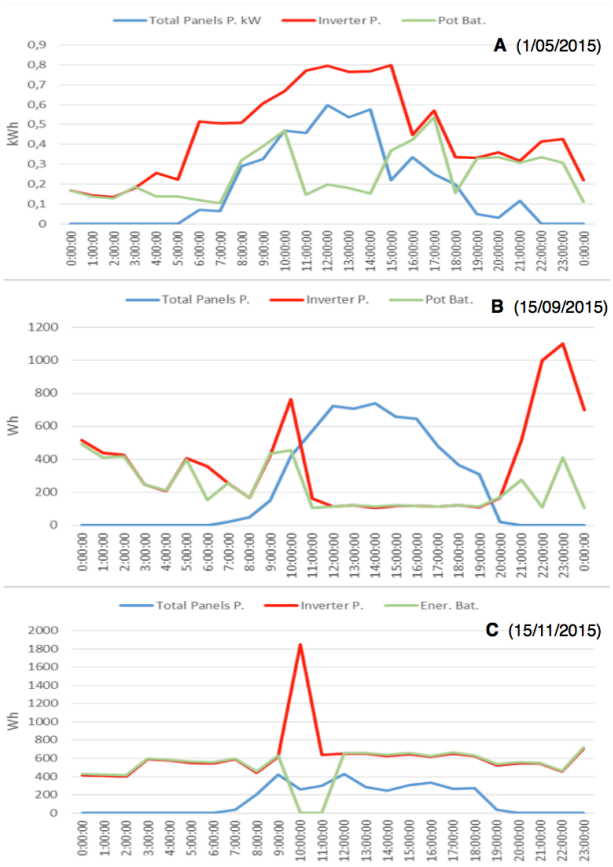


Figura 6.119. Comportamiento energético de la vivienda 4ºF en diferentes días de diferentes meses

En la figura 6.119 se muestran como ejemplo varias gráficas sobre el comportamiento energético de esta vivienda en diferentes días de diferentes meses. Nótese el desajuste ya mencionado entre generación y consumo.

En estas gráficas se muestra, con la línea azul la energía suministrada por los paneles FV a las baterías, con la línea verde, la suministrada por las baterías a la vivienda, y con la línea roja la energía consumida en la vivienda. Nótese, que hay ciertos momentos del día, bien por exceso de demanda o porque los niveles de carga de las baterías alcanzan estados mínimos, en los que el consumo de la vivienda no puede ser abastecido por las baterías, de forma que la vivienda es conectada en esos períodos a la red de suministro eléctrico; mientras tanto, los paneles continúan produciendo energía y cargando las baterías.

6.4.7 Análisis del ahorro energético en las viviendas instrumentadas

A continuación pasamos a analizar el comportamiento energético de las viviendas instrumentadas.

6.4.7.1 Vivienda 4º E

Comparando las figuras 6.114 y 6.115, se observa el desapareamiento entre la energía producida/consumida, con la facturada por la compañía suministradora. Esto quiere decir que los periodos de mayor generación renovable no coinciden con los de menos consumo de la red eléctrica.

La solución adoptada para esta vivienda, donde toda la energía renovable generada se vierte directamente, no es óptima en este caso porque, durante el periodo de generación (luz del día), la vivienda está prácticamente desocupada y, por tanto, con muy poco consumo. Sin embargo, cuando se necesita más energía (vivienda ocupada), no hay producción renovable, ya que coincide con la noche y las primeras horas del día. Esto, además de originar un desfase entre generación renovable y consumo real de la casa, obliga a *tirar* la energía a una resistencia disipadora (ver figura 6.102), ya que por la normativa actual no se puede verter el excedente energético a la red. No obstante si, como es de preveer, la normativa cambiara, la instalación de esta casa podría suponer una notable inyección económica en base a la venta energética para sus propietarios.

En resumen, y con la normativa actual, esta instalación no es óptima ni aconsejable para una vivienda con el régimen de ocupación y uso de la analizada; sí lo sería para un régimen de ocupación y uso que concentrara las cargas durante el día.

6.4.7.2 Vivienda 4ºF

Desde que se comenzó la monitorización de consumo y producción energética, se ha podido constatar de forma expresa los rendimientos de la solución energética en cuanto a consumo y generación. En la Figura 6.117, se puede observar la producción y el consumo mensual real, medido en la instalación, desde mayo de 2015 hasta el 12 de diciembre de 2015.

Las desviaciones entre la energía producida y consumida, frente a la facturada por la compañía suministradora, son debidas a que la producción se realiza solamente a horas en las que hay sol, frente al consumo que es a cualquier hora. En cualquier caso, esta opción aproxima bastante el consumo real a la generación realizada, aunque a veces, debido al dimensionado de la instalación (paneles + baterías), se queda un poco corta la solución adoptada.

Nótese del análisis de la figura 6.118 la significativa bajada de consumo con respecto al mismo periodo del año anterior. Nótese también que el consumo estimado por la compañía distribuidora para el mes de mayo era de aproximadamente 1.100 kWh; sin embargo el consumo ha sido de algo menos de 100 kWh.

Del análisis realizado, queda claro que para el modo de vida de los habitantes de las viviendas 4ºE y 4ºF, la instalación renovable de esta última es mucho más eficiente que la de la primera. No obstante, queda claro también que la instalación de la vivienda 4ºF está subdimensionada, por lo cual no puede cubrir toda la demanda energética de la vivienda. La solución es sencilla; aunque en su día el proyecto no pudo abordar, por limitaciones de presupuesto, una instalación de mayor producción, ahora bastaría con que el propietario/a hiciera una inversión propia para escalar al alza su instalación. Según los cálculos que hemos realizado, precisaría una

instalación prácticamente doble a la actual; en concreto 2.708 Wp en paneles solares y un banco de baterías de 1.405 Ah.

6.4.8 Caracterización de las soluciones propuestas

A continuación, a partir de un estudio previo donde se han analizado las soluciones constructivas presentes en las viviendas de crecimiento urbano de las décadas 50, 60 y 70, se proponen las soluciones que han dado lugar al estudio de las diferentes caracterizaciones constructivas hasta llevarnos a las propuestas de actuación incluidas en el punto 6.5.1 de este capítulo.

Ha de tenerse en cuenta que la solución cerramiento-carpintería trabaja de forma conjunta, aunque en este apartado se analizan de forma separada.

Es de destacar, como conclusión importante de este apartado, que el estado constructivo inicial de los cerramientos analizados no es relevante desde el punto de vista del ahorro de energía, representado por el valor de U antes y después de la rehabilitación. Así vemos que, aún tratándose de soluciones constructivas muy diferentes, su valor de U inicial varía relativamente poco (del orden de la décima o la centésima de punto) en comparación con la gran disminución de U resultante después de la rehabilitación energética propuesta (del orden del punto o punto y medio).

Otras opciones de rehabilitación mediante insuflado de cámaras con material aislante resultan poco recomendables, por el riesgo que comportan de acumulación de humedad y hongos en los puentes térmicos del cerramiento (emparchado de frentes de forjado y pilares, y en general disontinuidades en la cámara). Actuaciones a base de pinturas termoreflexivas tampoco han dado el resultado esperado.

6.4.8.1 Cerramientos analizados presentes en las viviendas

Los tipos de cerramientos existentes en las viviendas analizadas pertenecen a los siguientes grupos:

C1: Valor de U = 1,053 W/m²K. Sección constructiva del cerramiento y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.121).

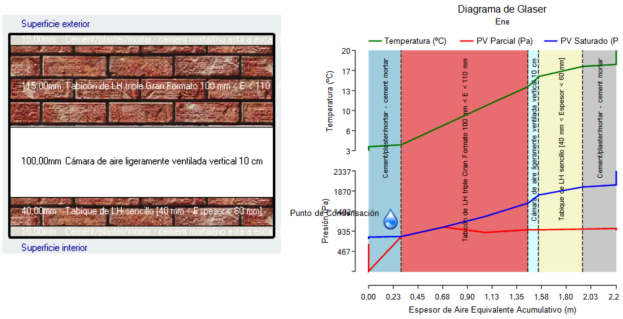


Figura 6.121. Cerramiento C1. Sección constructiva y diagrama de Glaser

C2: Valor de U = 1,757 W/m²K. Sección constructiva del cerramiento y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.122).

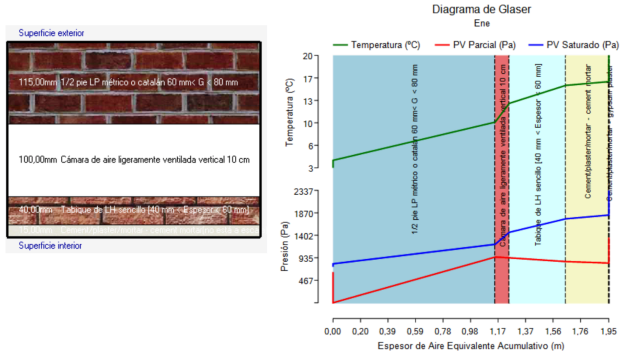


Figura 6.122. Cerramiento C2. Sección constructiva y diagrama de Glaser

C3: Valor de U = 1,694 W/m²K. Sección constructiva del cerramiento y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.123).

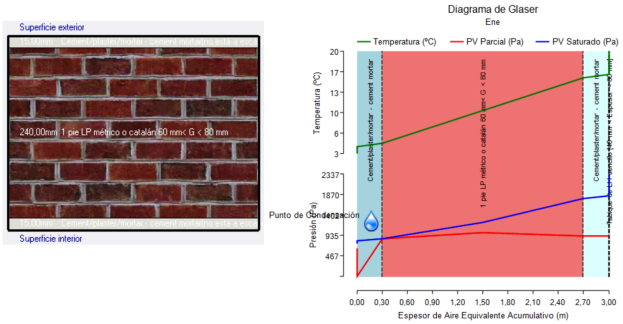


Figura 6.123. Cerramiento C3. Sección constructiva y diagrama de Glaser

C4: Valor de U = 1,671 W/m²K. Sección constructiva del cerramiento y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.124).

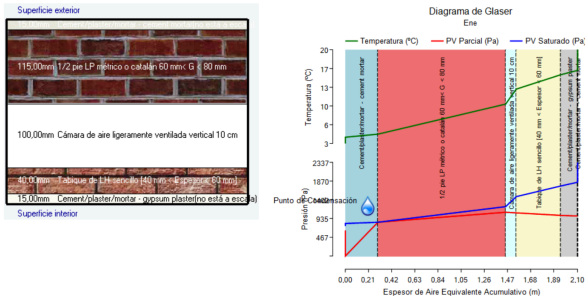


Figura 6.124. Cerramiento C4. Sección constructiva y diagrama de Glaser

C5: Valor de U = 1,731 W/m²K. Sección constructiva del cerramiento y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.125).

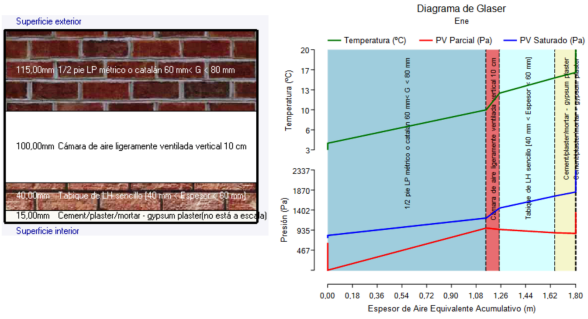


Figura 6.125. Cerramiento C5. Sección constructiva y diagrama de Glaser

C6: Valor de U = 1,671 W/m²K. Sección constructiva del cerramiento y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.126).

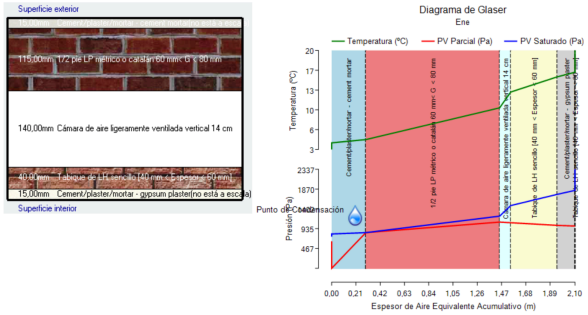


Figura 6.126. Cerramiento C6. Sección constructiva y diagrama de Glaser

C7: Valor de U = 1,328 W/m²K. Sección constructiva del cerramiento y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.127).

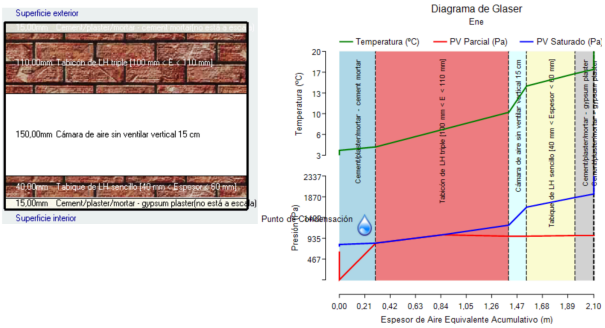


Figura 6.127. Cerramiento C7. Sección constructiva y diagrama de Glaser

C8: Valor de U = 1,036 W/m²K. Sección constructiva del cerramiento y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.128).

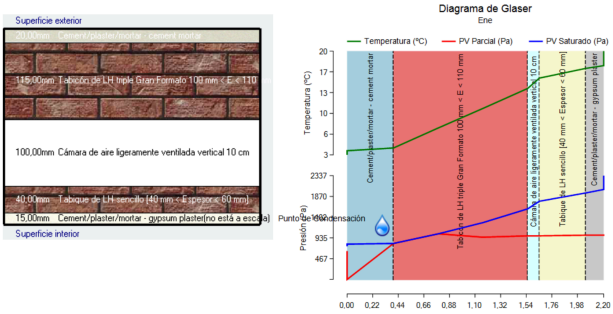


Figura 6.128. Cerramiento C8. Sección constructiva y diagrama de Glaser

Como se puede comprobar por los datos de transmitancia térmica (U) en los ocho cerramientos analizados, de uso generalizado en los crecimientos urbanos de las décadas de los 50, 60 y 70, las diferencias no son notables, salvo quizás en el caso de los cerramientos C1 y C8.

Esto quiere decir que, en general, la rehabilitación energética del cerramiento será independiente de la naturaleza constructiva específica anterior del elemento, de modo que la mejora obtenida será debida fundamentalmente a la solución adoptada y no a la original presente en la vivienda.

Este aspecto es importante, ya que simplifica el tratamiento a llevar a cabo en cuanto a tipos, centrando el problema en la solución de rehabilitación a adoptar, la ubicación de la

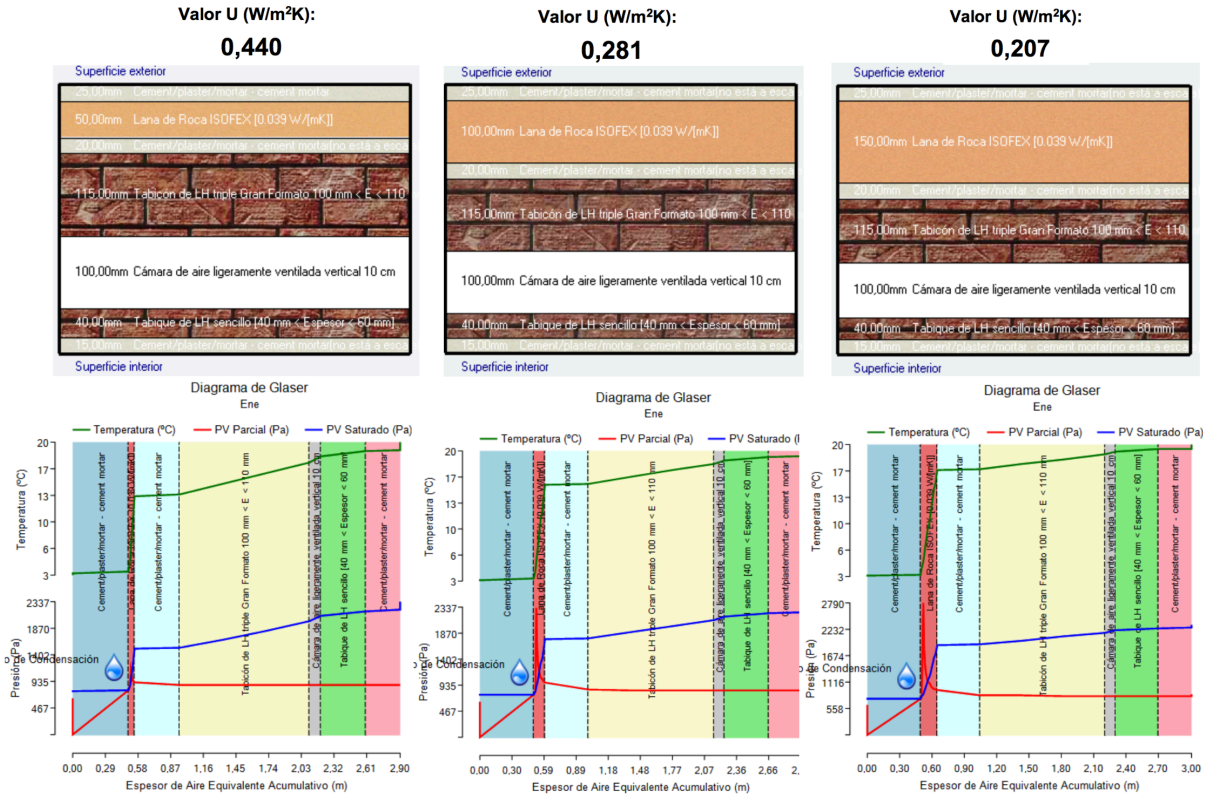


Figura 6.129. Soluciones propuestas al cerramiento original C1

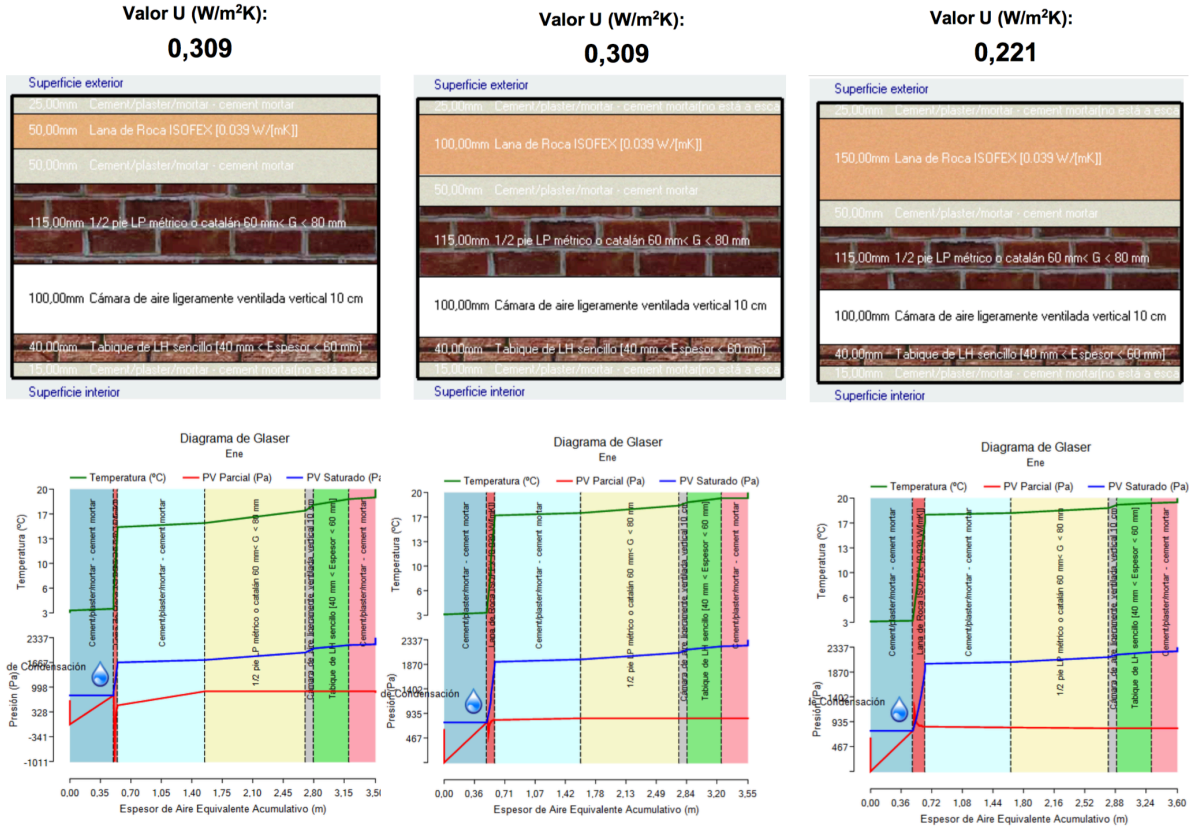


Figura 6.130. Soluciones propuestas al cerramiento original C2

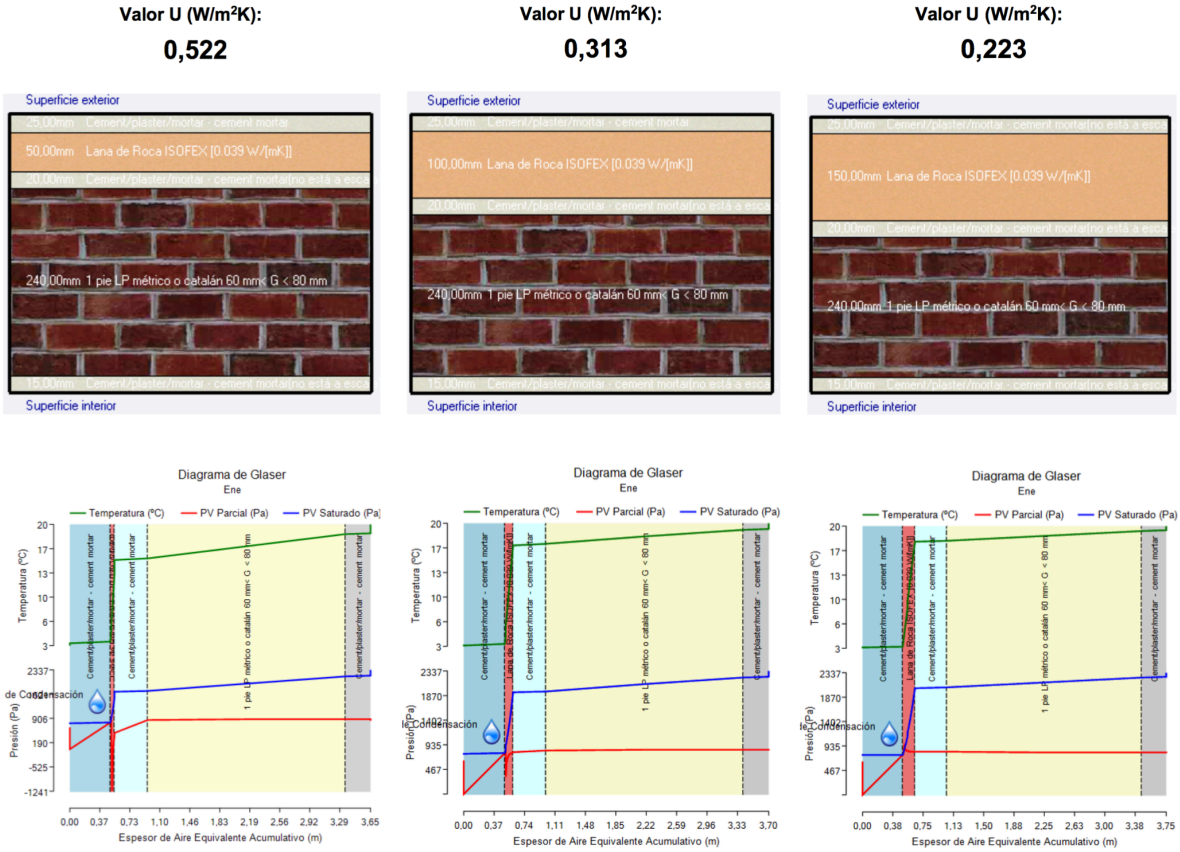


Figura 6.131. Soluciones propuestas al cerramiento original C3

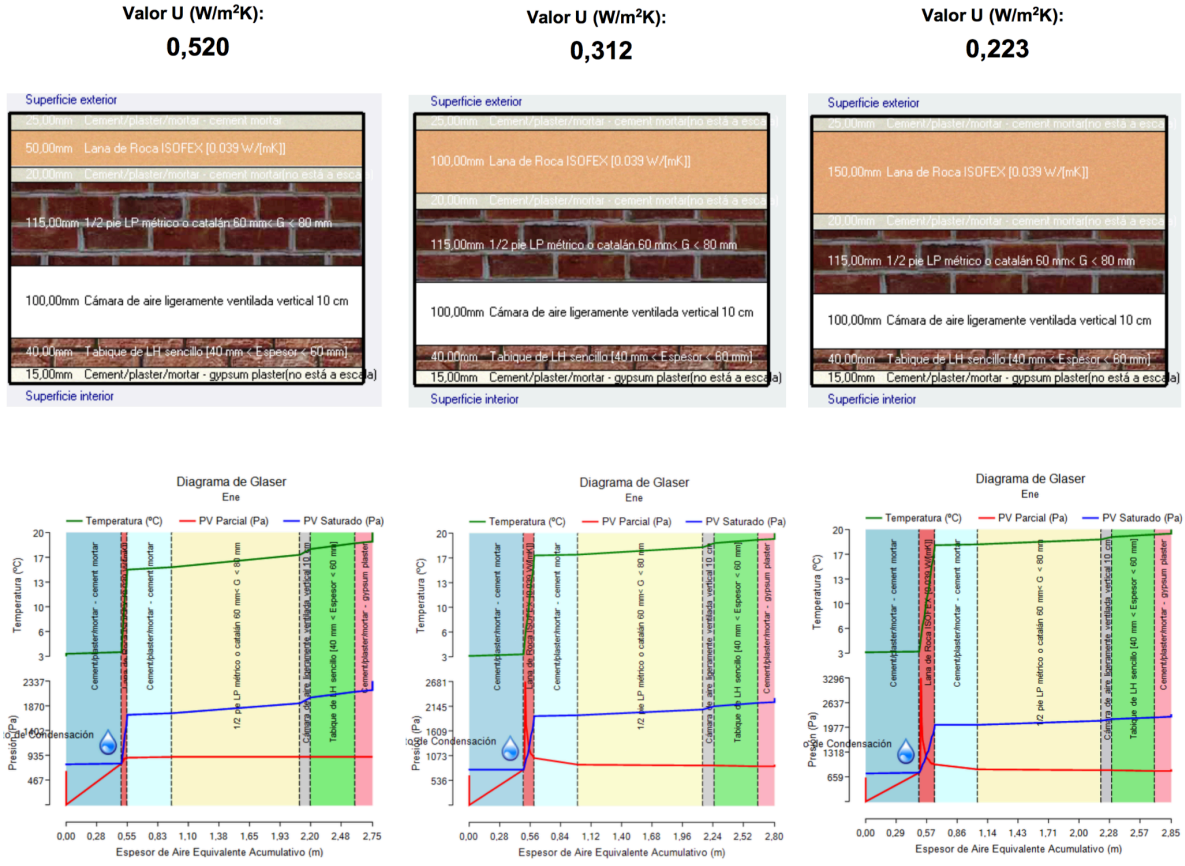


Figura 6.132. Soluciones propuestas al cerramiento original C4

Valor U (W/m²K): **0,509** | **Valor U (W/m²K):** **0,308** | **Valor U (W/m²K):** **0,221**

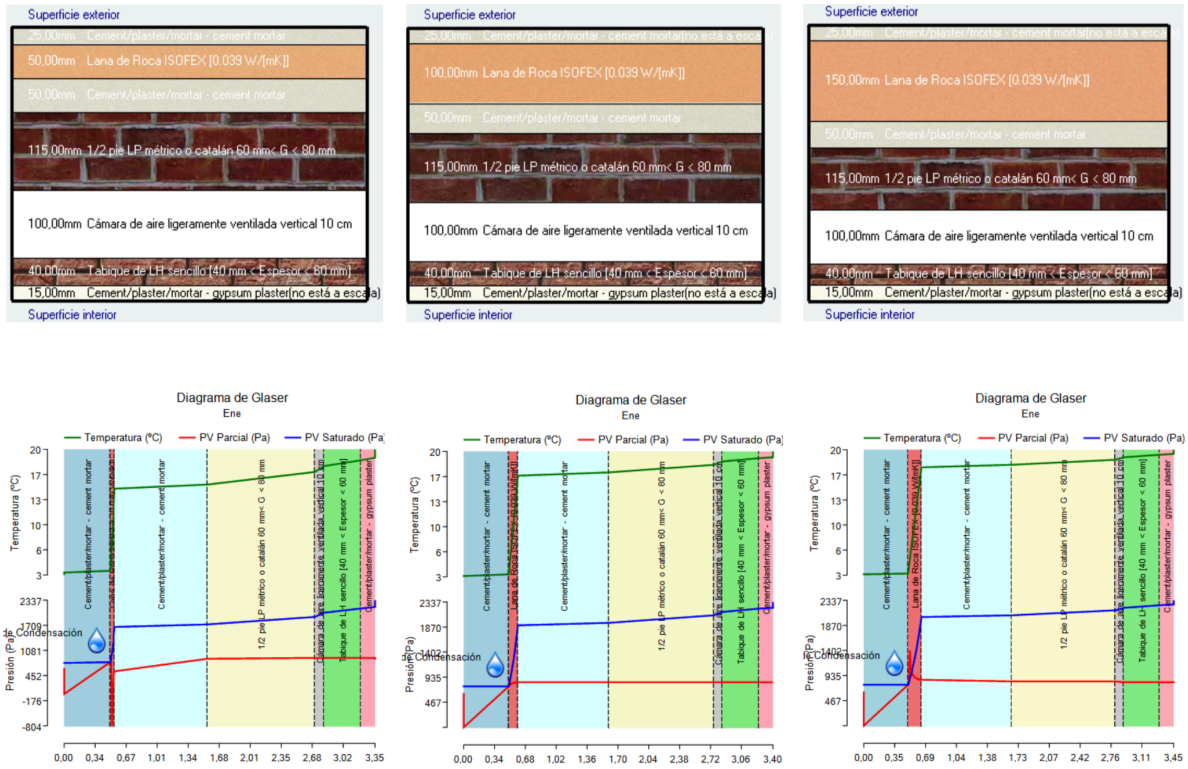


Figura 6.133. Soluciones propuestas al cerramiento original C5

Valor U (W/m²K): **0,520** | **Valor U (W/m²K):** **0,312** | **Valor U (W/m²K):** **0,223**

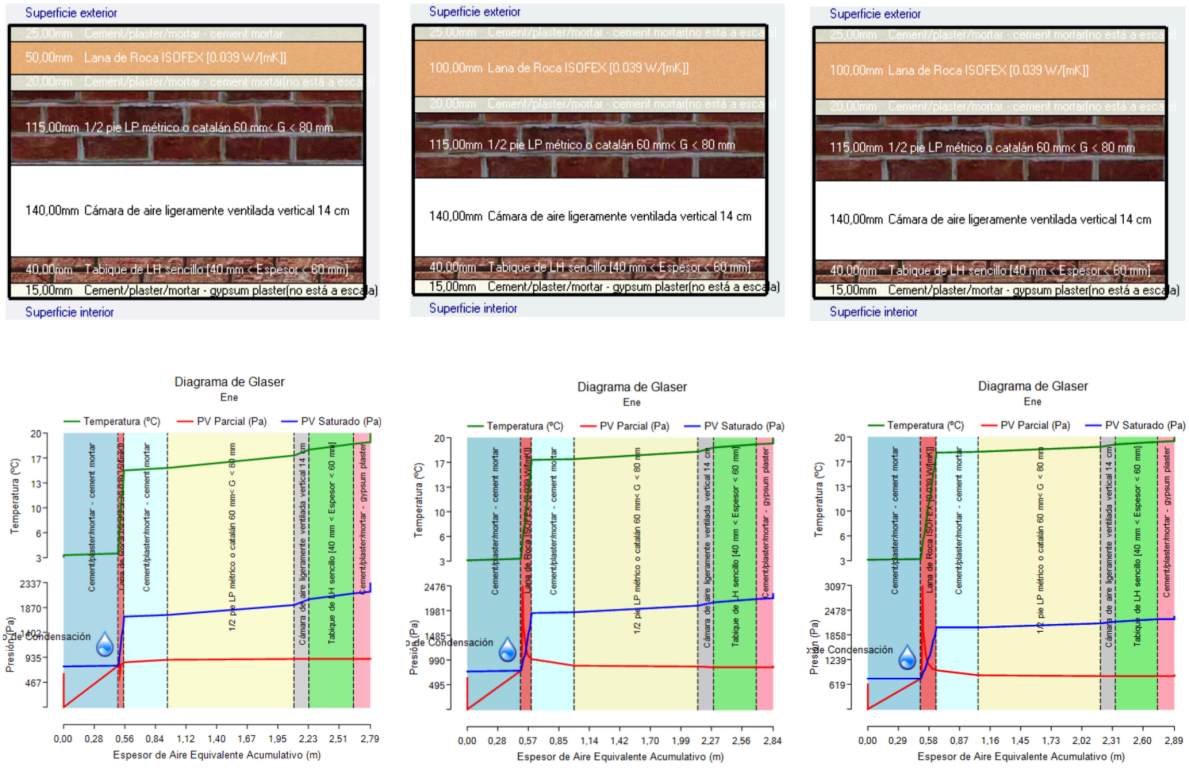


Figura 6.134. Soluciones propuestas al cerramiento original C6

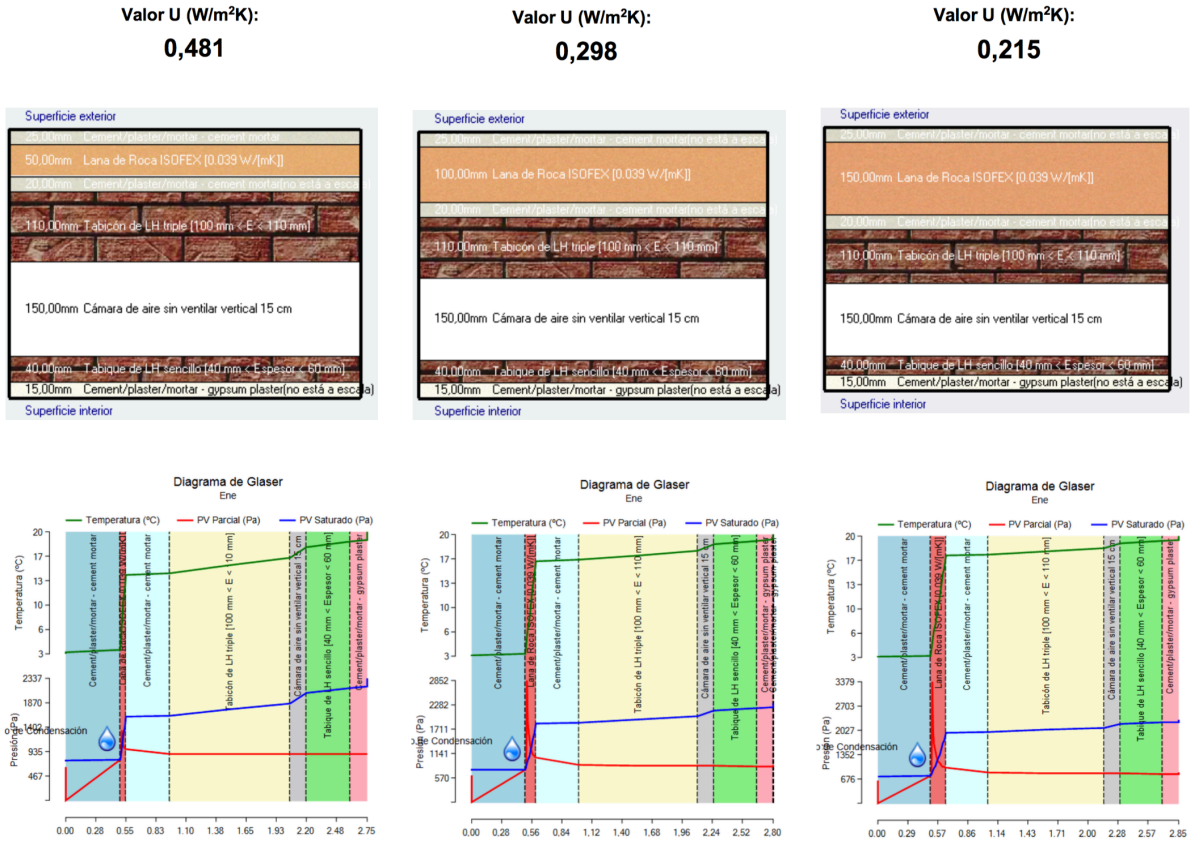


Figura 6.135. Soluciones propuestas al cerramiento original C7

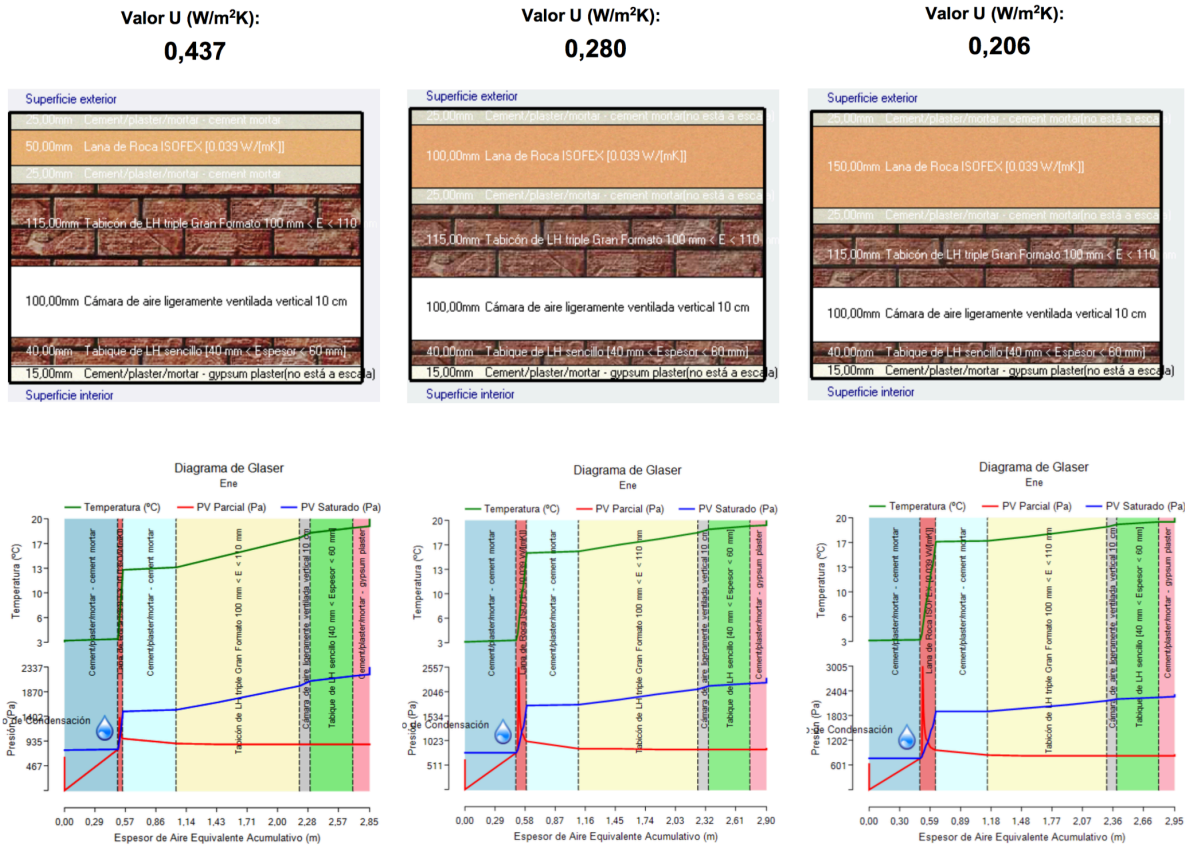


Figura 6.136. Soluciones propuestas al cerramiento original C8

vivienda y sus condiciones climáticas específicas. En el apartado siguiente se reafirma este hecho.

6.4.8.2 Propuesta de soluciones a los cerramientos originales presentes en las viviendas

Para cada uno de los grupos de cerramientos identificados, proponemos tres soluciones de mejora según lo descrito a continuación.

6.4.8.2.1 Soluciones propuestas al cerramiento original C1

En la figura 6.129 se muestran las soluciones propuestas de mejora del cerramiento original C1. Nótese la mejora notable obtenida en el valor de U del cerramiento original, el cual puede pasar de 1,053 W/m²K a 0,440, 0,281 y 0,207 W/m²K, en función del tipo de espesor de SATE utilizado (5, 10 y 15 cm de lana mineral *Isofex*).

6.4.8.2.2 Soluciones propuestas al cerramiento original C2

En la figura 6.130 se muestran las soluciones propuestas de mejora del cerramiento original C2. Nótese la mejora notable obtenida en el valor de U del cerramiento original, el cual puede pasar de 1,757 W/m²K a 0,309, 0,281 y 0,207 W/m²K, en función del tipo de espesor de SATE utilizado (5, 10 y 15 cm de lana mineral *Isofex*).

6.4.8.2.3 Soluciones propuestas al cerramiento original C3

En la figura 6.131 se muestran las soluciones propuestas de mejora del cerramiento original C3. Nótese la mejora notable obtenida en el valor de U del cerramiento original, el cual puede pasar de 1,694 W/m²K a 0,522, 0,313 y 0,223 W/m²K, en función del tipo de espesor de SATE utilizado (5, 10 y 15 cm de lana mineral *Isofex*).

6.4.8.2.4 Soluciones propuestas al cerramiento original C4

En la figura 6.132 se muestran las soluciones propuestas de mejora del cerramiento original C4. Nótese la mejora notable obtenida en el valor de U del cerramiento original, el cual puede pasar de 1,671 W/m²K a 0,520, 0,312 y 0,223 W/m²K, en función del tipo de espesor de SATE utilizado (5, 10 y 15 cm de lana mineral *Isofex*).

6.4.8.2.5 Soluciones propuestas al cerramiento original C5

En la figura 6.133 se muestran las soluciones propuestas de mejora del cerramiento original C5. Nótese la mejora notable obtenida en el valor de U del cerramiento original, el cual puede pasar de 1,731 W/m²K a 0,509, 0,308 y 0,221 W/m²K, en función del tipo de espesor de SATE utilizado (5, 10 y 15 cm de lana mineral *Isofex*).

6.4.8.2.6 Soluciones propuestas al cerramiento original C6

En la figura 6.134 se muestran las soluciones propuestas de mejora del cerramiento original C6. Nótese la mejora notable obtenida en el valor de U del cerramiento original, el cual puede pasar de 1,671 W/m²K a 0,520, 0,312 y 0,223 W/m²K, en función del tipo de espesor de SATE utilizado (5, 10 y 15 cm de lana mineral *Isofex*).

6.4.8.2.7 Soluciones propuestas al cerramiento original C7

En la figura 6.135 se muestran las soluciones propuestas de mejora del cerramiento original C7. Nótese la mejora notable obtenida en el valor de U del cerramiento original, el cual puede pasar de 1,328 W/m²K a 0,520, 0,312 y 0,223 W/m²K, en función del tipo de espesor de SATE utilizado (5, 10 y 15 cm de lana mineral *Isofex*).

6.4.8.2.8 Soluciones propuestas al cerramiento original C8

En la figura 6.136 se muestran las soluciones propuestas de mejora del cerramiento original C8. Nótese la mejora notable obtenida en el valor de U del cerramiento original, el cual

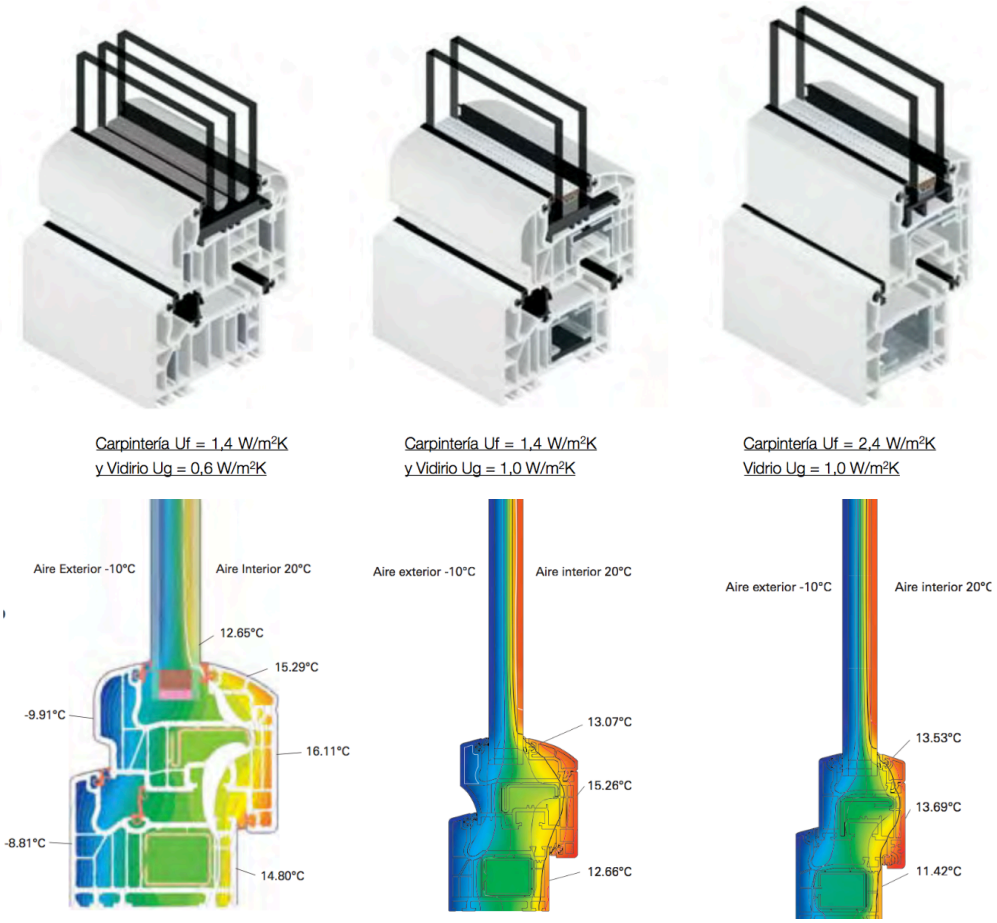


Figura 6.137. Propuesta de soluciones a las carpinterías originales presentes en las viviendas (Fuente: Schüco)

puede pasar de 1,036 W/m²K a 0,437, 0,280 y 0,206 W/m²K, en función del tipo de espesor de SATE utilizado (5, 10 y 15 cm de lana mineral *Isofex*).

6.4.8.3 Carpinterías analizadas presentes en las viviendas

En este apartado hemos tenido que tomar una decisión que permitiera estudiar la generalidad y no los casos puntuales de viviendas que a lo largo de su vida útil hayan tenido alguna intervención por parte de sus propietarios, en el sentido de mejorar el tipo de carpinterías utilizadas.

Así, el criterio adoptado ha sido considerar que el tipo de carpintería original en las viviendas de los crecimientos urbanos de los 50, 60 y 70 es de perfilería corredera de aluminio sin rotura de puente térmico (Uf > 5 W/m²K) y vidrio monolítico de 4 mm de espesor (Ug > 5 W/m²K). Téngase en cuenta que éste es un criterio prudente, en el sentido de que a partir de aquí cualquier intervención mejora la original.

6.4.8.3.1 Propuesta de soluciones a las carpinterías originales presentes en las viviendas

Las soluciones de mejora de las carpinterías originales se clasifican en dos tipos: intervenciones de mejora del marco y del vidrio alojado en su interior.

Distinguimos dos tipos de marco, con valores de Uf de 2,4 y 1,4 W/m²K, asimilables a soluciones de PVC de 74 y 82 mm de espesor total de carpintería, con cinco y siete cámaras respectivamente.

Estos dos valores de marco se complementan con otros dos de vidrio de Ug de 1,0 y 0,6 W/m²K, asimilables a soluciones de espesor total 28 mm (6-16-6) y 48 mm (6-15-6-15-6). Éste último vidrio sólo es compatible con la carpintería de 1,4 W/m²K debido su espesor total. Por tanto, las soluciones analizadas son las que aparecen en la figura 6.137.

6.4.8.4 Medianeras y particiones analizadas presentes en las viviendas

Se incluyen soluciones de tabiquería tradicionales, consistentes en tabique de ladrillo hueco enfoscada o guarnecida por ambas caras.

En las figuras 6.138 y 6.139 se incluye el esquema constructivo, el valor de U y el diagrama de Glaser de las dos soluciones de tabiquería caracterizadas.

Se incluyen soluciones de medianería tradicionales, consistentes en tabicón de hueco doble o citara de ladrillo cerámico, enfoscada por el exterior. También se incluye una solución mejorada de doble tabicón con cámara de aire interior (M5).

En las figuras 6.140 a 6.144 se incluye el esquema constructivo, el valor de U y el diagrama de Glaser de las cinco soluciones de medianería caracterizadas.

6.4.8.4.1 Solución propuesta a las particiones y medianeras originales

Este proyecto propone actuación a nivel de crecimientos urbanos, esto es, a nivel de polígonos residenciales, que en su mínima expresión será un edificio, pero que en general se refiere a agrupaciones e incluso barrios completos. Por tanto, el concepto de intervenir en medianera sólo tendría sentido si la actuación se realiza a nivel de vivienda particular. En el caso de este proyecto, la propuesta es intervenir en la envolvente completa del edificio, con lo cual no ha lugar a realizar intervenciones en medianeras.

Por razones análogas, resulta irrelevante actuar en las particiones interiores de las viviendas, ya que todas ellas se encuentran dentro de la envolvente térmica. No se propone, por tanto, la intervención de mejora de U en medianeras ni en particiones de viviendas.

Los tipos de particiones y medianeras existentes en las viviendas analizadas pertenecen a los siguientes grupos:

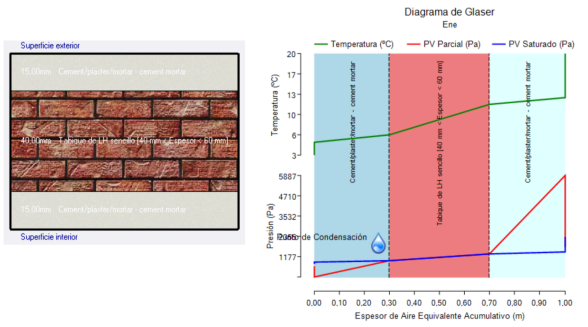


Figura 6.138. Partición P1. Sección constructiva y diagrama de Glaser

P1: Valor de U = 2,553 W/m²K. Sección constructiva y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.138).

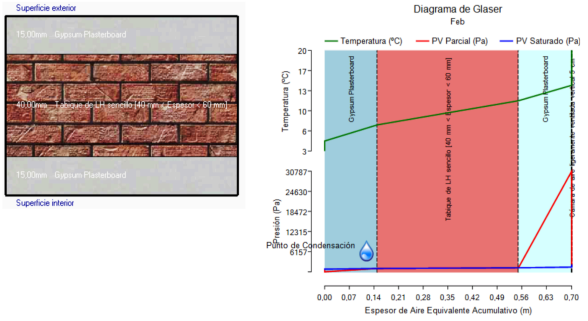


Figura 6.139. Partición P2. Sección constructiva y diagrama de Glaser

P2: Valor de U = 2,127 W/m²K. Sección constructiva y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.139).

M1: Valor de U = 2,510 W/m²K. Sección constructiva y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.140).

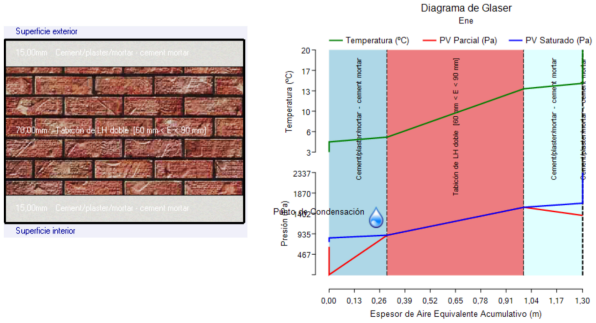


Figura 6.140. Medianera M1. Sección constructiva y diagrama de Glaser

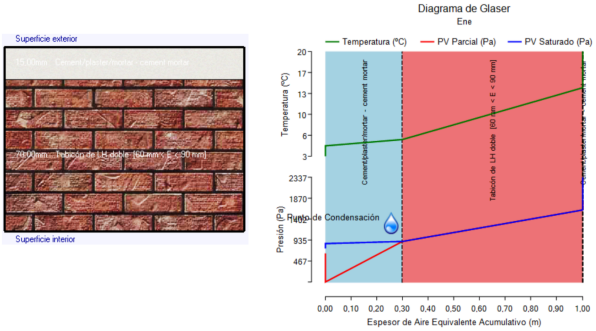


Figura 6.141. Medianera M2. Sección constructiva y diagrama de Glaser

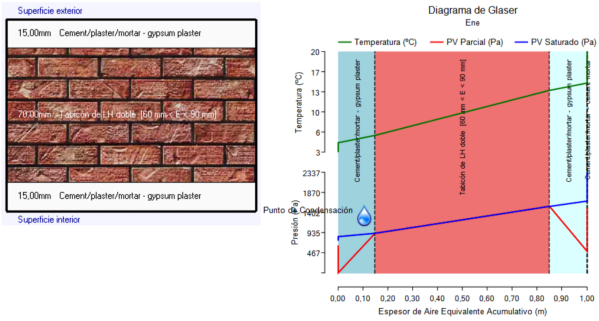


Figura 6.142. Medianera M3. Sección constructiva y diagrama de Glaser

M2: Valor de U = 2,649 W/m²K. Sección constructiva y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.141).

M3: Valor de U = 2,407 W/m²K. Sección constructiva y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.142).

M4: Valor de U = 2,369 W/m²K. Sección constructiva y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.143).

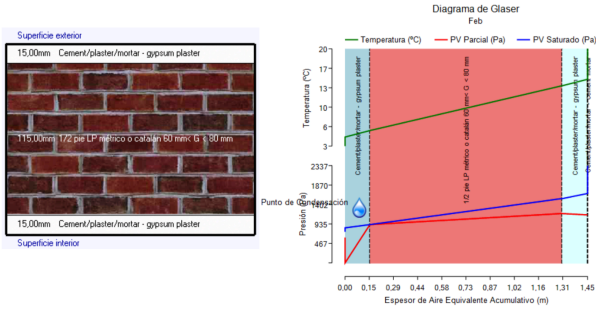


Figura 6.143. Medianera M4. Sección constructiva y diagrama de Glaser

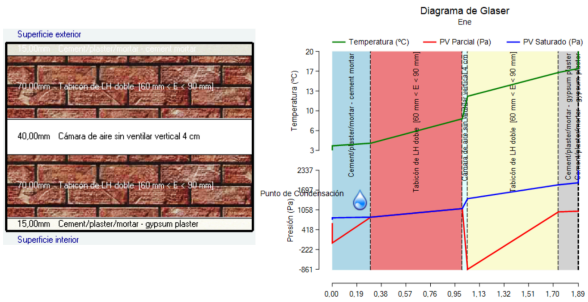


Figura 6.144. Medianera M5. Sección constructiva y diagrama de Glaser

M5: Valor de U = 1,310 W/m²K. Sección constructiva y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.144).

6.4.8.5 Cubiertas analizadas presentes en las viviendas

Los tipos de cubierta existentes en las viviendas analizadas pertenecen a los siguientes grupos:

CP: Valor de U = 1,434 W/m²K. Sección constructiva de la cubierta y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.145).

CI: Valor de U = 1,228 W/m²K. Sección constructiva de la cubierta y su Diagrama de Glaser. (Figura 6.146).

No siendo muy diferentes los datos de transmitancia térmica (U) en las dos tipologías de cubierta analizadas, de uso generalizado en los crecimientos urbanos de las décadas de los 50, 60 y 70, la rehabilitación energética de la cubierta será razón de la naturaleza constructiva específica anterior del elemento, ya que en modo alguno podemos intervenir de

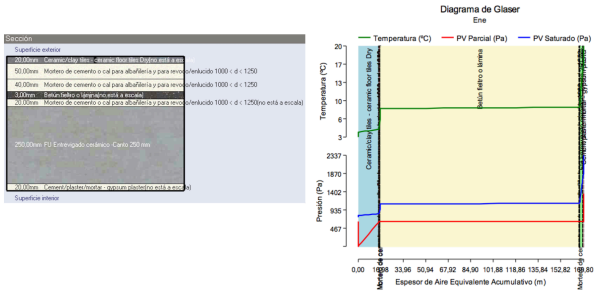


Figura 6.145. Cubierta CP. Sección constructiva y diagrama de Glaser

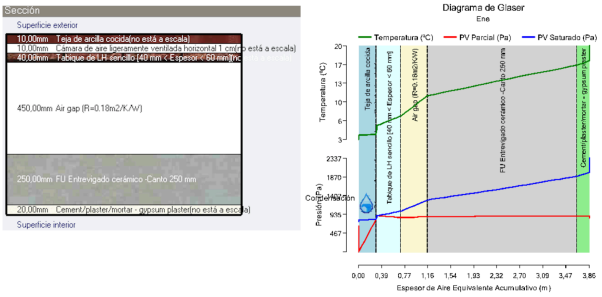


Figura 6.146. Cubierta CI. Sección constructiva y diagrama de Glaser

igual manera en una azotea plana que en un faldón inclinado de teja. Este aspecto es importante, ya que nos obliga a prescribir una solución específica de rehabilitación por tipología (material y puesta en obra), variando para cada una de ellas los espesores.

Para el caso de cubierta plana optamos por rehabiltar colocando directamente sobre la solería un tablero machihembrado de poliestrieno extruido (XPS) de espesor variable (5, 10 y 15 cm), un geotextil de protección y una capa de grava de 10 cm. Para el caso de cubierta inclinada, primero hemos de levantar el faldón de teja para posteriormente proyectar espuma de poliuretano (PUR) en espesores variables (3, 6 y 9 cm), un mortero de regularización y de nuevo volver a montar el faldón de teja original.

6.4.8.5.1 Propuesta de soluciones a las cubiertas originales presentes en las viviendas

Para cada una de los grupos de cubiertas identificadas, proponemos tres soluciones de mejora según lo descrito a continuación.

Soluciones propuestas a la cubierta original CP:

En la figura 6.147 se muestran las soluciones propuestas de mejora de la cubierta original CP. Nótese la mejora notable obtenida en el valor de U de la cubierta plana original, el cual puede pasar de 1,434 W/m²K a 0,451, 0,271 y 0,194 W/m²K, en función del tipo de espesor de poliestireno extruido utilizado (5, 10 y 15 cm de XPS).

Soluciones propuestas a la cubierta original CI:

En la figura 6.148 se muestran las soluciones propuestas de mejora de la cubierta original CP. Nótese la mejora notable obtenida en el valor de U de la cubierta plana original, el cual puede pasar de 1,228 W/m²K a 0,525, 0,336 y 0,247 W/m²K, en función del tipo de espesor de poliuretano proyectado utilizado (3, 6 y 9 cm de PUR).

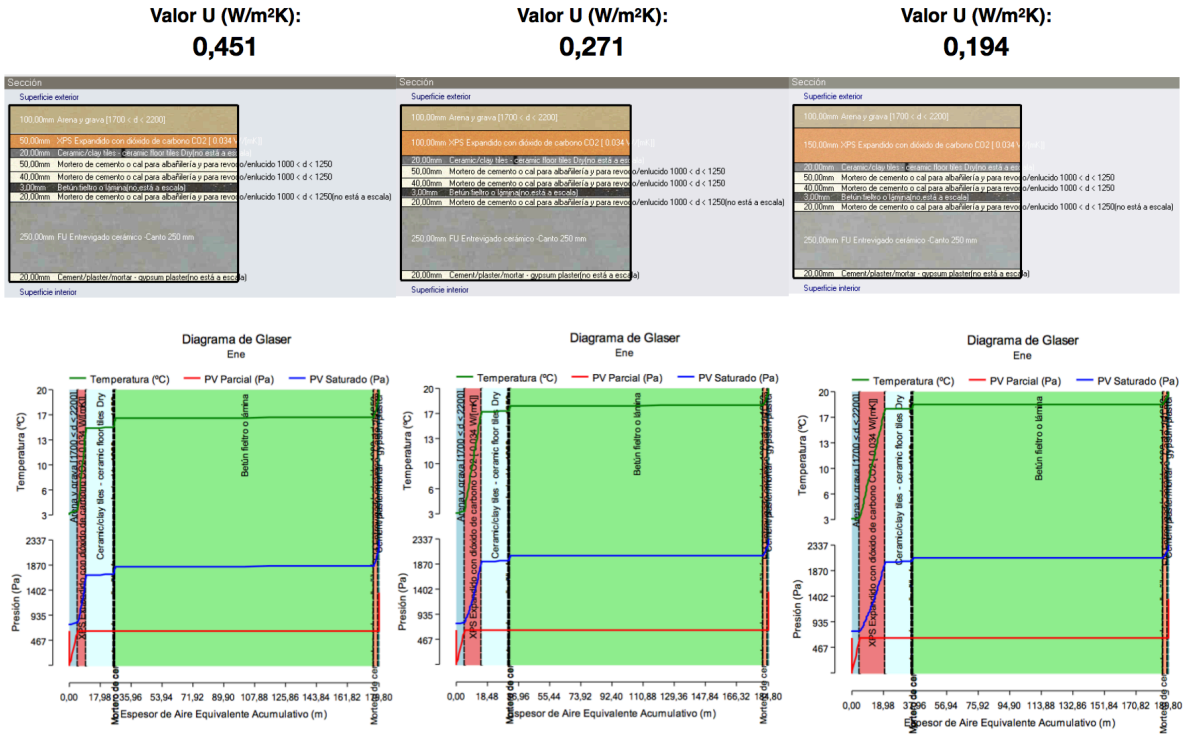


Figura 6.147. Soluciones propuestas a la cubierta original CP

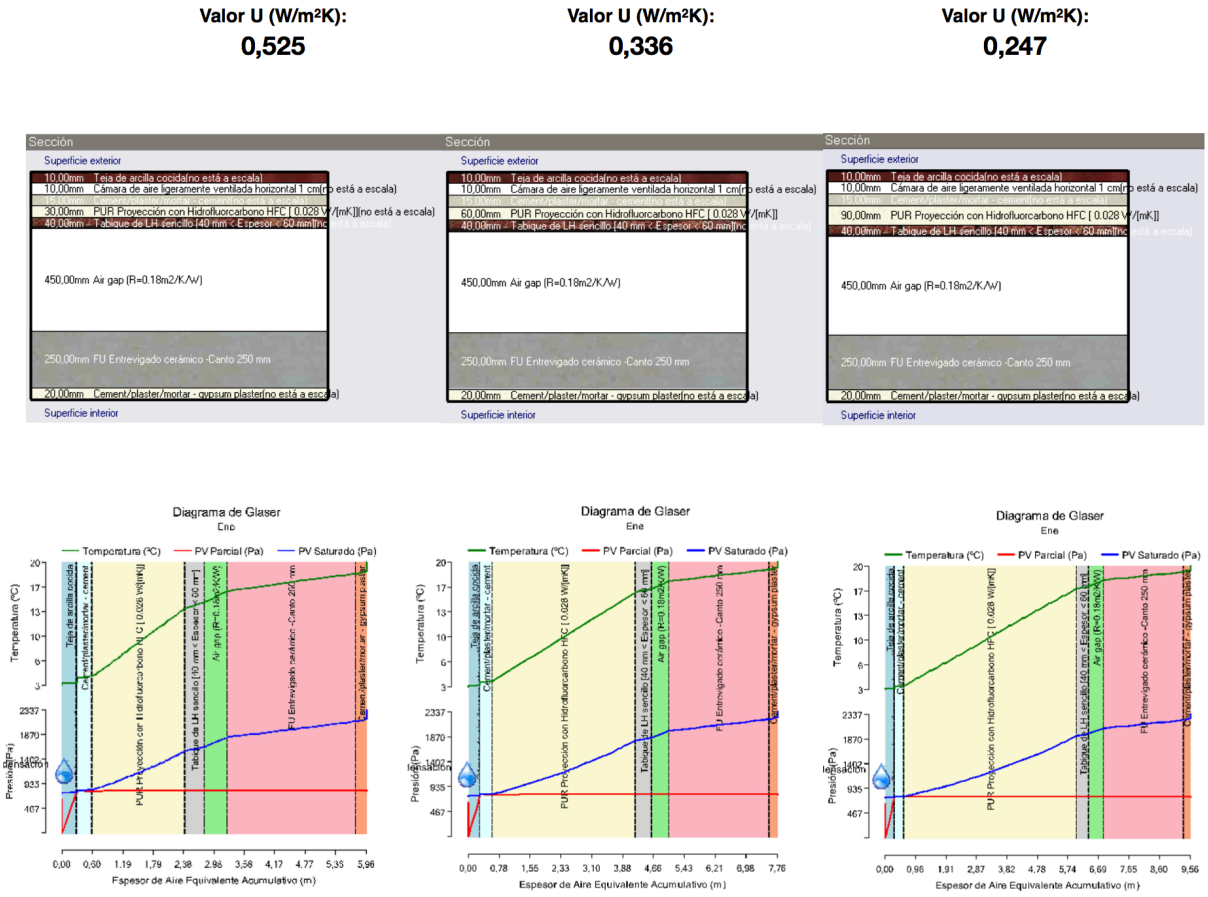


Figura 6.148. Soluciones propuestas a la cubierta original CI

6.5 PROPUESTAS DE ACTUACIÓN Y PERIODOS DE AMORTIZACIÓN

A continuación exponemos el conjunto de propuestas de actuación a acometer para lograr el objetivo de rehabilitación energética fijado en este proyecto de investigación. Igualmente, para cada una de ellas se incorpora un análisis de los periodos de amortización asociados.

6.5.1 Propuestas de actuación

En las ocho tablas (6.14 a 6.21) que se incluyen a continuación, están condensadas las cientos de simulaciones realizadas en las ocho capitales andaluzas, para obtener todas aquellas soluciones de rehabilitación que permiten alcanzar una mejora en la eficiencia energética superior al 20%, que es el objetivo primario de este proyecto.

A partir de estas tablas se ha tomado el criterio rehabilitador de considerar la solución más económica de entre las que permiten reducir un mínimo de un 20% los consumos de energía en la vivienda. La solución se toma como una combinación del porcentaje anual de reducción en calefacción y en refrigeración de la vivienda. Estas ocho soluciones, una para cada capital, se recogen en la tabla 6.22.

A continuación y por comodidad, se vuelve a insertar la tabla 6.1 de este documento, renombrada ahora como tabla 6.23. Dicha tabla resume todos los polígonos de crecimiento considerados en las ocho capitales andaluzas para las décadas 50, 60 y 70. Puesto que la tabla 6.22 contiene el precio unitario por m² de la rehabilitación seleccionada para cada capital, y la tabla 6.23 el número de viviendas seleccionadas de cada una de ellas, es fácil y cómodo realizar una proyección económica para obtener, en media, la inversión necesaria que permita la rehabilitación de las viviendas seleccionadas con los criterios decididos. Así, en la tabla 6.24 se agrupan por capital y década los costes medios de rehabilitación considerando una superficie útil media de vivienda de 65 m², correspondiente a una vivienda tipo en bloque de tres dormitorios y tipología plurifamiliar en bloque. No obstante, las tablas 6.14 a 6.21 permiten adoptar cualquier otro tipo de criterio que, bajo otra consideración de superficie se ajuste más a la realidad del parque edificado Andaluz. Es más, si la actuación se realiza parcela catastral a parcela catastral, bastará con analizar la superficie real de cada vivienda que vaya a ser actuada para obtener su coste preciso y realista.

En el Anexo 6.3.5 se incluyen todos los análisis realizados de presupuesto y mediciones para cada una de las actuaciones de rehabilitación incluidas en las tablas 6.14 a 6.23.

La tabla 6.24 aporta desde nuestro punto de vista una información muy valiosa para tener una idea objetiva y basada en un estudio científico, del coste de la rehabilitación de los crecimientos seleccionados en Andalucía para las décadas de los años 50, 60 y 70.

No obstante, siendo importantes los datos incluidos en la tabla 6.24, quizás es aún más importante el hecho de que la administración pública puede generar su propia tabla 6.24 a partir de los datos que el proyecto pone a disposición. Esto es, en vez de tomar el criterio de calefactar por debajo de los 18 ºC y refrigerar por encima de los 25 ºC, la administración puede tomar otro criterio, a partir del cual se obtendrían otras tablas diferentes 6.14 a 6.21 y, como consecuencia, una nueva tabla 6.24, con una valoración económica también diferente.

Centrándonos en la tabla 6.24, obtenida con los criterios ya explicados, se aprecia de forma inmediata la similitud en los costes de actuación en las ocho capitales andaluzas, con un mínimo de 28,56 €/m² en Cádiz, Córdoba y Granada y un máximo de 29,19 €/m² en las cinco restantes. No obstante, la diferencia de tan sólo 0,63 €/m² implica que, en la práctica, podría tomarse el mismo coste unitario para todas las actuaciones en las ocho capitales andaluzas.

6.5.2 Periodos de amortización

En las ocho tablas (6.25 a 6.32) que se incluyen a continuación, se desarrollan los periodos de amortización de la inversión, para cada uno de los treinta y tres casos de actuación en cada capital andaluza.

En cada una de estas ocho tablas se ha marcado el plazo de amortización correspondiente al criterio de actuación ya fijado en el apartado anterior. Estas ocho soluciones, una para cada capital, se recogen en la tabla 6.33.

Nótese que la solución elegida (fila marcada en verde) se hace en base al criterio de que es la que obtiene el porcentaje de ahorro más próximo y por encima al 20%. Esta solución es la más barata de las posibles, pero no siempre es la que se amortiza en menos tiempo (obsérvese, por ejemplo, en la tabla 6.25, la solución A4). Consecuentemente, a partir de la información aportada por este estudio, la administración deberá decidir qué criterio adopta.

Para el cálculo del periodo de retorno de la inversión hemos procedido de la siguiente manera. En primer lugar, se ha fijado el coste de cada una de las actuaciones de rehabilitación por medición y valoración de cada uno de las partidas a precio de mercado, en la fecha de realización de este proyecto de investigación (ver apartado 3.3.2). En segundo lugar, se ha calculado la cantidad de energía anual que la vivienda actuada dejaba de consumir para cada una de las actuaciones de rehabilitación estudiadas. En tercer lugar, y utilizando el sistema de tarificación denominado *Precio voluntario al pequeño consumidor de electricidad* (antes *Tarifa de último recurso*), se ha calculado, en base a la estimación media de un término de potencia y un término de energía en un escenario conservador durante el periodo de amortización, el ahorro anual en términos de factura eléctrica de la vivienda. Finalmente, de la relación entre el coste de la actuación de rehabilitación y el ahorro anual en términos de consumo resulta el plazo de amortización de la inversión expresado en años.

6.6 CONCLUSIONES

EREBA2020 ha permitido cuantificar técnica y económicamente las diferentes soluciones de rehabilitación disponibles y validar su eficiencia. A partir de sus resultados se ha puesto a disposición de la Consejería de Fomento y Vivienda de la Junta de Andalucía un amplio catálogo de actuaciones tipo que podrían servir de base para planificar la política de eficiencia y rehabilitación energética en la edificación en nuestra Comunidad Autónoma. En concreto, a fecha de la realización de esta investigación:

1. No existían datos significativos del consumo de energía real en edificios en Andalucía. La instrumentación y el seguimiento del consumo en edificios desarrollado, promueve una mayor conciencia medioambiental en los usuarios y favorece comportamientos responsables.

2. Todavía hoy son escasos los estudios que contrastan los resultados obtenidos por los programas de simulación energética con los datos medidos *in situ* en el edificio. Ninguno había sido realizado en Andalucía a la escala y en la fecha de EREBA2020.

3. Se constató que las barriadas de desarrollo de los años 50, 60, 70 y principios de los 80, constituyen verdaderos sumideros energéticos por la alta transmitancia térmica de las envolventes con que fueron construidas. Pequeñas mejoras en los aislamientos reducen significativamente la demanda de energía del edificio. Como demuestra esta investigación, actuando sobre la envolvente térmica -mejorando sus propiedades de aislamiento y estanqueidad- se obtienen espectaculares ahorros en los consumos energéticos.

4. La mejora de la eficiencia energética para el cumplimiento de los compromisos ambientales en Andalucía pasa necesariamente por la actuación sobre el patrimonio edificado.

5. Mejorando la eficiencia de los sistemas HVAC instalados -equipos de aire acondicionado, calderas de calefacción, etc.- es posible mejorar drásticamente los consumos energéticos.

6. Implementar sistemas de generación de energía renovable distribuida posibilita que el edificio genere su propia demanda energética y, por tanto, pase de ser emisor de CO_2 a carbón neutral o sumidero de CO_2.

7. Algunas de las actuaciones planteadas en el proyecto tienen un periodo de retorno de la inversión económica muy bajo. En términos de disminución de toneladas de CO_2 emitidas, la inversión resulta todavía más rentable.

8. Con el precio de la energía en constante aumento, se prevé a medio plazo un horizonte de expectativas para la rehabilitación energética aún más favorable que el existente en la fecha de realización de EREBA2020.

9. El mercado de la rehabilitación energética constituye hoy por hoy un ámbito de actividad especializada, necesaria para la recuperación del sector de la construcción, el cual parece que está empezando a abandonar una profunda crisis, con capacidad para la generación de puestos de trabajo estables y de calidad. Este proyecto marca pautas para la mejor relación coste-beneficio.

10. EREBA2020 permite objetivar el proceso de rehabilitación energética de viviendas sociales desde una perspectiva científico-técnica, adaptada a las condiciones climáticas andaluzas y a los recursos energéticos renovables disponibles en cada ámbito, para reducir los periodos de retorno de la inversión (perspectiva del usuario) y la demanda de energía no renovable que provoca un aumento de las emisiones de CO_2 (perspectiva de la Administración). Constituye un paso previo a futuras actuaciones a mayor escala que posibiliten un cambio de paradigma necesario en el mercado del consumo de energía y las emisiones de CO_2. De hecho, los resultados de este proyecto permiten que la Administración pueda hacer una planificación de inversiones con resultados demostrables a nivel de toda la Comunidad Autónoma.

En este sexto capítulo de la tesis doctoral hemos explorado las posibilidades de reducción del consumo de energía en el parque de viviendas sociales de las ocho capitales andaluzas, identificando mediante SIG los principales crecimientos y sus características arquitectónicas.

Igualmente hemos establecido una estrategia de rehabilitación energética específica para la reducción de un 20% de la demanda energética de la vivienda, con un plazo mínimo de amortización, analizando el catálogo de soluciones pasivas disponibles y proponiendo la mejor combinación específica posible en función de la capital de provincia elegida.

Otra de las aportaciones de este capítulo consiste en el desarrollo específico realizado para un canal de instrumentación *hardware/ software* alámbrico y otro inalámbrico en las viviendas actuadas de *Casas del Carmen*. Esta instrumentación desarrollada está permitiendo al Grupo de investigación *TEP192 Control y Robótica* extraer datos en tiempo real y procesarlos mediante herramientas de análisis para evaluar el rendimiento de las rehabilitaciones energéticas realizadas.

A partir de la integración arquitectónica de las energías renovables fotovoltaica y microeólica con medidas pasivas y sistemas activos de la máxima eficiencia, hemos demostrado la viabilidad de transformar una vivienda social pre normativa en una MEB que puntualmente funciona como una +ZEB.

Este sexto capítulo constituye la aplicación práctica al caso de los edificios existentes, de las contribuciones disponibles para la persecución del objetivo del edificio de energía mínima, desde la arquitectura y la ingeniería.

Contribuciones desde la Arquitectura y la Ingeniería a los edificios de energía mínima TESIS DOCTORAL



Capítulo 7

Conclusiones y Desarrollos futuros / Conclusions and Future developments

7. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS / *CONCLUSIONS AND FUTURE DEVELOPMENTS*

Este último capítulo, que cierra la memoria de la tesis, está orientado a recoger todas las conclusiones derivadas de los trabajos de investigación realizados, lo cual conforma la primera sección del capítulo, así como las principales aportaciones y futuras líneas de trabajo que se prevé pueden surgir de la tesis, que son el objeto de la segunda sección.

This last chapter, which closes the memory of the thesis, is aimed at collecting all the conclusions derived from the research carried out, which forms the first section of the chapter, as well as the main contributions and future lines of work that may be foreseen arise from the thesis, which are the object of the second section.

El objetivo fundamental de esta tesis ha sido el establecimiento de una metodología, tanto de obra nueva como de rehabilitación, para llevar a cabo edificios de consumo de energía mínimo, tanto nZEB como ZEB y +ZEB. El abarque del problema ha sido total, desde sus fundamentaciones teóricas mediante nuevos enfoques matemáticos y físicos, hasta implementaciones prácticas en forma de obra nueva y rehabilitada, pasando incluso por el diseño, desarrollo y construcción de todos los sistemas hardware/software que la nueva metodología ha demandado.

The main objective of this thesis has been the establishment of a methodology, both new work and rehabilitation, to carry out buildings of minimum energy consumption, both nZEB and ZEB and + ZEB. The scope of the problem has been total, from its theoretical foundations through new mathematical and physical approaches, to practical implementations in the form of new and rehabilitated work, including the design, development and construction of all hardware / software systems that the new methodology has sued.

La problemática de disminuir el consumo de energía en la edificación es un objetivo hoy en día de primer orden para las administraciones europea, estatal, autonómica y local, cada una en su ámbito competencial. De hecho, y en el caso concreto de España, los compromisos adquiridos por nuestros sucesivos gobiernos ante la Unión Europea, obligan a reglamentar en este sentido. Sin embargo, una cosa es la acción política y de reglamentación, y otra muy diferente su implementación final, la cual en este caso pasa irremediablemente a través de un cauce científico-técnico y tecnológico que, en muchos aspectos, aún no está resuelto. Y es precisamente aquí, donde pretende aportar esta tesis, esto es, en abordar el problema de la eficiencia energética en la edificación desde la casuística de España y países mediterráneos europeos (también y en general países con clima subtropical), donde las condiciones climáticas y por ende constructivas, son muy diferentes a las del centro y norte de Europa, EE UU, Canadá, etc.

The problem of reducing the consumption of energy in buildings is a first order goal nowadays for the European, state, autonomous and local administrations; each one in its field of competence. In fact, and in the specific case of Spain, the commitments acquired by our successive governments before the European Union, oblige to regulate in this sense. However, one thing is political and regulatory action, and another very different from its final implementation, which in this case irremediably passes through a scientific-technical and technological channel that, in many aspects, is still not resolved. It is precisely here that this thesis aims to contribute to the problem of energy efficiency in buildings from the case studies of Spain and European Mediterranean countries (also in general countries with a subtropical climate), where climatic conditions and therefore constructive, are very different from those of the center and north of Europe, USA, Canada, etc.

Dicho lo anterior, hay que reconocer sin embargo que fueron los países fríos del centro y norte de Europa y América, los que han abordado primero este problema de forma rigurosa, fundamentalmente a través de entes y asociaciones privadas con gran solvencia y credibilidad técnica. Así, se han introducido en el lenguaje de la construcción los conceptos nZEB y ZEB, los cuales forman parte ya de la jerga propia de arquitectos e ingenieros que trabajan en este campo. Sin embargo, aunque el objetivo a cumplir sea el mismo, el enfoque y la solución del problema es muy diferente en el norte y centro de Europa que en los países mediterráneos.

Having said that, it must be recognized that it was in the cold countries of central and northern Europe and the Americas that first tackled this problem rigorously, mainly through private entities and associations with great solvency and technical credibility. Thus, concepts nZEB and ZEB have been introduced in the construction language, which are already part of the jargon of architects and engineers working in this field. However, although the objective is the same, the approach and solution to the problem is very different in the north and center of Europe than in the Mediterranean countries.

Esencialmente, el problema a resolver en la Europa más septentrional es evitar que el calor se escape del edificio. Sin embargo, en la zona mediterránea, y muy especialmente en el sur de España, el problema la mayor parte del año es justo el contrario, esto es, evitar que el calor penetre al interior del edificio a través de su envolvente térmica. Con este objetivo en mente, un concepto de diseño de envolvente que imitase literalmente aquella propia de climas fríos haría que, simplemente con las cargas de residuales y de ocupación que se generan en una casa habitada, ésta se fuera recalentando de forma progresiva. Por otra parte, a pesar de la benignidad del clima la mayor parte del año en zonas subtropicales como las consideradas; es cierto que, dependiendo de la altitud y lejanía a la costa, hay meses en el año donde el frío se hace palpable, lo que impone un cambio de estrategia en el diseño de la envolvente térmica del edificio.

Essentially, the problem to be solved in northern Europe is to prevent heat escaping from the building. However, in the Mediterranean area, and especially in southern Spain, the problem most of the year is just the opposite, that is, to prevent the heat entering the building through its thermal envelope. With this aim in mind, a concept of envelope design that literally imitated that of cold climates would simply lead to a gradual overheating of the residual and occupational loads generated in an inhabited house. On the other hand, in spite of the benignity of the climate most of the year in subtropical zones like those considered; it is true that, depending on the altitude and distance to the coast, there are months in the year where the cold becomes palpable, which imposes a change of strategy in the design of the thermal envelope of the building.

Lo anterior implica que los conceptos nZEB, ZEB y +ZEB, englobados por el más genérico MEB, exigen una solución muy diferente en el norte que en el sur, siendo en éste donde el problema se vuelve más complejo, ya que se necesita que el funcionamiento de la envolvente térmica del edificio sea adaptativa en función de la estación del año considerada. De hecho, la eficiencia energética de un edificio está íntimamente relacionada con su capacidad de intercambio de calor con el entorno exterior, tanto cediendo calor al mismo como captándolo de él.

The above implies that the concepts nZEB, ZEB and + ZEB, encompassed by the most generic MEB, require a very different solution in the north than in the south, where the problem becomes more complex, since it requires the performance of the thermal envelope of the building is adaptive depending on the season of the year considered. In fact, the energy efficiency of a building is intimately related to its capacity of heat exchange with the outside environment, both giving heat to it and capturing it.

La eficiencia energética en clima subtropical pasa, a la vez, por conservar el calor interior del edificio en invierno y, sin embargo, ser capaz de disiparlo durante las horas nocturnas en verano, impidiendo que entre durante el día.

Resolver este complejo y retador problema con validez científica ha sido el hilo conductor de esta tesis. Hasta donde nuestro conocimiento y revisión bibliográfica ha podido alcanzar, si bien se han llevado a cabo soluciones puntuales, no había una metodología clara y, sobretodo, probada, que permitiera abordar el problema de obra nueva y rehabilitación en clima subtropical de forma científica y técnica, con el objetivo MEB en cualquiera de sus estadios.

Lo ambicioso del objetivo de la Tesis y la enorme carga de trabajo multidisciplinar que ha requerido llevar a cabo, ha sido posible gracias a la financiación con la que se ha contado y, sobre todo, al apoyo permanente del Grupo de Investigación *Control y Robótica* TEP192. Sus especialistas, compañeros de este doctorando en cada campo específico del saber que ha sido preciso abordar, han estado dando soporte continuo a este trabajo de investigación. El resultado final de esta tesis consiste en una nueva metodología, testeada técnicamente y con validez científica, para llevar a cabo la construcción y rehabilitación de edificios en clima subtropical con el objetivo MEB (nZEB, ZEB o +ZEB).

Energy efficiency in the subtropical climate is also conducive to conserving the building's interior heat in winter and yet being able to dissipate it during the night hours in summer, preventing it from entering during the day.

Solving this complex and challenging problem with scientific validity has been the thread of this thesis. As far as our knowledge and bibliographical revision have been able to reach, although specific solutions have been carried out, there was no clear and, above all, proven methodology, that allowed to approach the problem of new construction and retrofitting in subtropical climate in a scientific and technical way, with the objective MEB in any of its stages.

The ambition of the thesis objective and the enormous multidisciplinary workload that it has required to be carried out has been possible thanks to the financing with which it has been counted and, above all, to the permanent support of the TEP192 Control and Robotics Research Group. Its specialists, colleagues of this doctorate in each specific field of knowledge that has been addressed, have been giving continuous support to this research work. The final result of this thesis consists of a new methodology, technically tested and scientifically valid, to carry out the construction and retrofitting of buildings in subtropical climate with the objective MEB (nZEB, ZEB or + ZEB).

7.1 CONCLUSIONES / *CONCLUSIONS*

En el Capítulo 2 de esta tesis se ha enmarcado la misma a nivel normativo, tanto en lo que atañe a las propias reglamentaciones europeas y españolas de obligado cumplimiento, como a los estándares a nivel internacional emitidos por prestigiosos institutos y asociaciones.

En el capítulo se ha introducido en primer lugar el concepto genérico de eficiencia energética en la edificación, incluyendo una breve reseña histórica de la evolución de dicho concepto, así como de las diferentes normativas que han ido entrando en vigor en España en los últimos 40 años.

Chapter 2 of this thesis has been framed at the normative level, both with regard to the European and Spanish regulations themselves, as well as the international standards issued by prestigious institutes and associations.

The chapter has first introduced the generic concept of energy efficiency in buildings, including a brief historical review of the evolution of this concept, as well as the different regulations that have been in force in Spain in the last 40 years.

El análisis histórico, necesariamente breve por su corta edad, desemboca en el marco normativo actual, tanto español como europeo. También, se hace una incursión en otros marcos normativos de interés en el ámbito internacional, los cuales han sido elegidos por tener relación con investigaciones llevadas a cabo por el doctorando, concretamente el chino y el americano.

Si bien todas las normativas de los países desarrollados se están adaptando de forma acelerada al concepto de eficiencia energética en la edificación (un ejemplo es el CTE en España), hay que reconocer que centros e instituciones de prestigio, casi siempre de carácter privado, son las que van marcando el nivel máximo de exigencia en sus propuestas de certificaciones. Muchas de estas certificaciones voluntarias son paulatinamente incorporadas por los diferentes países en sus legislaciones propias. Así, en el capítulo 2 entramos a analizar y valorar las certificaciones internacionales que más importantes: Passivhaus, LEED, BREEAM y TRISTAR y otras.

Por último, el capítulo 2, primero de aportaciones de la tesis al estado del arte en su campo, establece un marco conceptual que permite englobar bajo una misma definición, el concepto de eficiencia energética en la edificación en sus diferentes estadios. Así, dependiendo del grado de eficiencia energética y de la incorporación de energías renovables a las instalaciones del edificio, éste puede comportarse como edificio de consumo de energía casi nulo (nZEB), nulo (ZEB) o positivo (+ZEB), esto es, que produce más energía de la que consume.

The historical analysis, necessarily short because of its young age, leads to the current normative framework, both Spanish and European. Also, an incursion into other international normative frameworks of interest, which have been chosen to have relation with investigations carried out by the doctorate, specifically the Chinese and the American.

Although all the regulations of the developed countries are being adapted to the concept of energy efficiency in building (an example is the CTE in Spain), it is important to recognize that prestigious centers and institutions, almost always of a private nature, are Those that mark the maximum level of exigency in its proposals of certifications. Many of these voluntary certifications are gradually incorporated by the different countries in their own legislations. Thus, in chapter 2 we began to analyze and evaluate the most important international certifications: Passivhaus, LEED, BREEAM and TRISTAR and others.

Finally, chapter 2, first of the thesis contributions to the state of the art in its field, establishes a conceptual framework that allows to include under one definition, the concept of energy efficiency in the building in its different stages. Thus, depending on the degree of energy efficiency and the incorporation of renewable energies into the building's facilities, it can behave as a zero-energy building (nZEB), zero (ZEB) or positive (+ZEB), that is, which produces more energy than it consumes.

La incorporación de las energías renovables a los edificios necesita, desde nuestro punto de vista, un análisis específico para que admita un encaje natural en los conceptos nZEB y ZEB. La razón es la siguiente, un edificio puede ser productor neto de energía pero no ser energéticamente eficiente, con lo cual no debería pertenecer al ámbito de las certificaciones de eficiencia energética; por otro lado, todos los edificios consumen energía, por muy eficientes que sean, ¿cómo podemos entonces trabajar con conceptos tan diferentes bajo un mismo paradigma?. Es necesaria, por tanto, una única definición que los englobe a todos y a la vez los caracterice, la cual es precisamente el hilo conductor de esta tesis, hasta el punto que forma parte de su título: edificio de consumo de energía mínima (MEB).

Un edificio MEB es aquel que en función de las condiciones específicas de su construcción, instalaciones y uso, se identifica con los estándares nZEB, ZEB o +ZEB. Así, un edificio +ZEB no es sólo aquel que genera energía neta (produce más de la que consume), sino que además consume energía mínima, esto es, su construcción, instalaciones y uso están optimizados para demandar el mínimo de energía posible.

A continuación del capítulo 2, el resto han sido ordenados afrontando primero los desarrollos hardware/software necesarios que permiten llevar a cabo la metodología que se propone (capítulos 3 y 4); para a continuación realizar implementaciones de obra nueva (capítulo 5) y rehabilitación (capítulo 6). Por supuesto y en función de las necesidades, en estos dos últimos capítulos se han llevado a cabo también desarrollos hardware/software. Éstos son justificados y explicados en apartados específicos dentro de ambos capítulos.

The incorporation of renewable energy into buildings needs, from our point of view, a specific analysis to allow a natural fit into the concepts nZEB and ZEB. The reason is the following, a building can be net producer of energy but not be energy efficient, which should not belong to the field of energy efficiency certifications. On the other hand, all buildings consume energy, no matter how efficient they are, how can we work with such different concepts under the same paradigm?. It is necessary, therefore, a single definition that encompasses all and at the same time characterizes them, which is precisely the guiding thread of this thesis, to the point that is part of its title: minimum energy consumption building (MEB).

A MEB building is one that, according to the specific conditions of its construction, facilities and use, is identified with the standards nZEB, ZEB or + ZEB. Thus, a building + ZEB is not only the one that generates net energy (produces more than it consumes), but also consumes minimal energy, that is, its construction, facilities and use are optimized to demand as little energy as possible.

After Chapter 2, the rest have been sorted by first tackling the hardware / software developments required to carry out the proposed methodology (chapters 3 and 4); And then implement new work (chapter 5) and retrofit (chapter 6). Of course and depending on the needs, these last two chapters have also been carried out hardware / software developments. These are justified and explained in specific sections within both chapters.

El capítulo 3 está dedicado a un nuevo enfoque en instalaciones de geotermia de muy baja entalpía (VLEGE). Hemos hecho mucho hincapié en ello en esta tesis porque es una forma relativamente barata de hacer una gran aportación de energía renovable en clima subtropical (por supuesto también en otros, ya que lo analizado en este capítulo se cumple prácticamente en toda la superficie de la tierra). En el capítulo demostramos que a apenas 5 m de profundidad, la temperatura del suelo durante todo el año permanece muy próxima (apenas un par de grados por encima y por debajo) a la media anual del lugar. Esto supone que, por ejemplo, en una ciudad como Huelva, donde la temperatura media anual es de 20 ºC, tenemos su subsuelo a 5 m muy próximo a esa temperatura durante todo el año.

Continuando con el ejemplo onubense, si fuéramos capaces de igualar la temperatura del suelo a 5 m de profundidad con el del interior de un edificio, éste podría mantenerse manera natural una temperatura interior entre 18 y 22 ºC durante todo el año.

Pero, ¿por qué 5 m?, pues simplemente porque un edificio con sótano tiene muy fácil, durante su proceso de construcción, excavar la parcela en el entorno de esa profundidad durante la ejecución de su cimentación, a un coste muy reducido. Ésta sería la profundidad óptima desde el punto de vista constructivo de la VLEGE a instalar y, sobre ella, se continuaría la construcción del edificio completo.

Chapter 3 is dedicated to a new approach to very low enthalpy geothermal (VLEGE) facilities. We have put great emphasis on this thesis because it is a relatively inexpensive way of making a large contribution of renewable energy in subtropical climate (of course also in others, since what is analyzed in this chapter is practically fulfilled in the whole surface of the earth). In the chapter we showed that at just 5 m depth, the year-round soil temperature remains very close (barely a couple of degrees above and below) to the annual mean of the site. This means that, for example, in a city like Huelva, where the annual average temperature is 20 ° C, we have its subsoil at 5 m very close to that temperature throughout the year.

Continuing the example of Huelva, if we were able to match the temperature of the soil 5 m deep with that of the interior of a building, it could maintain a natural temperature between 18 and 22 ° C throughout the year.

But why 5 m?. Simply because a building with basement has very easy, during its construction process, to excavate the plot around that depth during the construction works of its foundation, at a very low cost. This would be the optimum depth from the constructive point of view of the VLEGE to install and, on it, the construction of the complete building would continue.

La clave del diseño de una VLEGE, está en conocer la difusividad térmica del terreno donde va a ser ubicada, esto es, qué cantidad de calor puede comunicar éste a la VLEGE. A partir de ahí se puede dimensionar la instalación, pero, ¿qué ocurre si los cálculos son erróneos y la instalación no está correctamente dimensionada?. Pues que si ha habido un infradimensionado, la cantidad de calor que podrá aportar/absorber para conseguir la temperatura de confort en el edificio será insuficiente, con lo cual será necesario un aporte externo con algún equipo auxiliar y las expectativas de eficiencia y, por consiguiente, de ahorro energético, no se verán satisfechas. Por el contrario, un sobredimensionado, habrá incrementado el coste de la VLEGE de forma innecesaria y, el retorno de la inversión, requerirá más años, con lo cual ésta será menos rentable e incluso puede que injustificable. En cualquier caso, el hecho de que la mayoría de las veces la estructura del edificio descanse sobre la VLEGE, impide corregir errores a futuro.

Con esta idea en mente, supimos, por la revisión bibliográfica realizada, que la única forma fehaciente que había de conocer la difusividad térmica del suelo era a través del thermal response test (TRT), el cual es muy caro y complejo de llevar a cabo, por lo que está injustificado en la mayoría de edificaciones. A partir de ahí nos pusimos a trabajar en la posibilidad de encontrar una forma más sencilla y barata de conocer la difusividad térmica del suelo donde se proyecta instalar un sistema VLEGE. Ésta, después de varios desarrollos matemáticos, fue encontrada; bastaba con conocer la temperatura del suelo a la profundidad de la VLEGE para, a partir de ahí, conocer su difusividad térmica. Pues bien, encontrada la forma, se trataba de hacer el procedimiento lo más barato y preciso posible, de modo que fuera atractivo y de fácil aplicación. Para ello construimos una sonda de temperatura y, aprovechando los ensayos geotécnicos preceptivos por reglamentación de seguridad estructural en el edificio (CTE-DB-SE-C), utilizamos la misma máquina de sondeo para introducir un dispositivo diseñado específicamente para medir la temperatura del terreno a la profundidad de la VLEGE a instalar.

With this idea in mind, we learned from the bibliographical review that the only reliable way to know the thermal diffusivity of the soil was through the thermal response test (TRT), which is very expensive and complex to carry out, so it is unjustified in most buildings. From there we started to work on the possibility of finding a simpler and cheaper way of knowing the thermal diffusivity of the soil where it is planned to install a VLEGE system. This, after several mathematical developments, was found; It was enough to know the temperature of the soil at the depth of the VLEGE to, from there, to know its thermal diffusivity. Well, found the way, it was to make the procedure as cheap and accurate as possible, so that it was attractive and easy to apply. In order to do this, we constructed a temperature probe and, using the requisite geotechnical tests for structural safety regulations in the building (CTE-DB-SE-C), we used the same drilling machine to introduce a device specifically designed to measure the temperature of the terrain to the depth of the VLEGE to be installed.

The key to the design of a VLEGE is to know the thermal diffusivity of the terrain where it is to be located, that is, how much heat it can communicate to the VLEGE. From there you can size the installation, but what happens if the calculations are wrong and the installation is not correctly sized?. For if there has been an undersize design, the amount of heat that can be supplied / absorbed to achieve the comfort temperature in the building will be insufficient, which will require an external input with some auxiliary equipment and the efficiency expectations and, consequently, energy saving, will not be satisfied. On the contrary, an oversized one, will have increased the cost of VLEGE unnecessarily and, the return of investment, will require more years, which will be less profitable and even unjustifiable. In any case, the fact that most of the time the structure of the building rests on the VLEGE, prevents correct errors in the future.

Con este objetivo en mente, diseñamos una sonda, que se explica en el capítulo, así como la electrónica auxiliar y una interface de usuario que, en tiempo real, iba proporcionando la temperatura del terreno a diferentes profundidades. Hemos realizado medidas en intervalos desde casi la superficie hasta los 5 m, con objeto de resolver no solo un problema práctico sino también científico. Esto es, justificar experimentalmente los desarrollos matemáticos realizados.

El capítulo, en base al trabajo llevado a cabo, demuestra que la metodología planteada es apropiada y bien fundamentada, y supone una aportación fundamental al correcto diseño y dimensionado de instalaciones VLEGE.

El capítulo 4 ha afrontado otro reto científico-tecnológico no menos importante que el anterior. Se trataba ahora de encontrar una forma barata, sencilla y práctica de medir transmitancia térmica (U-*Value*) en la edificación. ¿Por qué transmitancia térmica? Pues porque es la variable que da la medida de transferencia de calor a través de un elemento constructivo, de modo que si nos centramos en la envolvente de un edificio, su transmisividad térmica nos dará idea de la capacidad del edificio de intercambiar calor con el entorno. Idealmente interesa que esta capacidad sea la mínima posible (valor de U-*Value* muy bajo), de modo que en todo momento la vivienda pueda tener un grado de confort térmico controlado, independientemente de la temperatura que haya en el exterior.

Hoy en día las normas constructivas son muy exigentes respecto de la transmisividad térmica de los materiales de construcción, así como de las carpinterías, y en general de cualquier estructura que pueda servir de aislante entre la vivienda y el exterior. Más aún, el conocimiento que se tiene actualmente de la conductividad térmica de los materiales usados en la construcción de obra nueva, hace que, con la necesaria aproximación, se pueda saber a priori la transmisividad térmica de un elemento constructivo determinado, si éste se ha ejecutado con la calidad adecuada. Por tanto, la necesidad de medir el U-*Value* en obra nueva es probablemente puntual.

With this aim in mind, we designed a probe, which is explained in the chapter, as well as an auxiliary electronics and a user interface that, in real time, was providing the ground temperature to different depths. We have taken measurements at intervals from almost the surface up to 5 m, in order to solve not only a practical but also a scientific problem. That is, to justify experimentally the mathematical developments carried out.

The chapter, based on the work carried out, demonstrates that the methodology proposed is appropriate and well-founded, and supposes a fundamental contribution to the correct design and dimensioning of VLEGE installations.

Chapter 4 has faced another scientific-technological challenge no less important than the previous one. It was now a question of finding an inexpensive, simple and practical way to measure thermal transmittance (U-Value) in the building envelope. Why thermal transmittance? Because it is the variable that gives the measure of heat transfer through a constructive element, so that if we focus on the envelope of a building, its thermal transmissivity will give us an idea of the capacity of the building to exchange heat with the environment. Ideally, this capacity should be as small as possible (very low value of U-Value), so that at all times the house can have a controlled degree of thermal comfort, regardless of the temperature outside.

Nowadays the construction regulations are very demanding with respect to the thermal transmissivity of the building materials, as well as of the carpentries, and in general of any structure that can serve as insulation between the house and the exterior. Moreover, the current knowledge of the thermal conductivity of the materials used in the construction of new buildings, makes it possible, with the necessary approximation, to know a priori the thermal transmissivity of a particular constructive element, if it has been executed properly. Therefore, the need to measure the U-Value in new constructions is probably not as generalized as in retrofitting.

Dicho lo anterior, ¿qué ocurre en el caso de la rehabilitación de edificios existentes? Que las necesidades de medida de la transmitancia térmica de sus envolventes son mucho mayores. Hemos de tener en cuenta que la inmensa mayoría del parque construido en España, por ejemplo, pertenece a una época donde las normas sobre eficiencia energética en la edificación eran muy laxas, o incluso, para construcciones anteriores a la década de los 70 del siglo pasado, simplemente inexistentes.

La única forma de probar fehacientemente que la capacidad de aislamiento de la envolvente de un edificio ha aumentado en una cantidad concreta después de una rehabilitación, exige haber medido antes y después de la misma. Así, teniendo en cuenta la enorme cantidad de viviendas que han de ser rehabilitadas en España y, en general, en muchas otras partes de mundo, si se quieren cumplir los compromisos de eficiencia energética exigidos, la medida del U-*Value* se demuestra un factor clave en este proceso.

No obstante lo anterior, la medida actual del U-*Value* en base a los dispositivos comerciales disponibles, es un proceso tedioso, que consume mucho tiempo y además es muy caro. Por otro lado, los equipos comerciales sólo permiten medir cada vez el valor de la transmitancia en un punto, lo cual puede llevar además, en el mejor de los casos, varios días por medida. Consecuentemente, si, como es normal, en una actuación de rehabilitación se precisan múltiples medidas, sólo hay dos soluciones: emplear un tiempo muy prolongado en realizar todas las medidas (han de ser secuenciales), lo cual lo convierte en un método muy poco práctico; o adquirir tantos equipos como medidas a realizar para poderlas llevar a cabo a la vez, lo que supondría seguramente un coste inabordable.

That said, what happens in the case of buildings retrofitting?. The measurement needs the thermal transmittance of its thermal envelopes to be much greater. We must take into account that the vast majority of the built park in Spain, for example, belongs to an era where the energy efficiency regulations in building were very lax or even for constructions prior to the 1970s , simply nonexistent.

The only way to prove reliably that the insulation capacity of a building envelope has increased by a certain amount after a rehabilitation requires that it be measured before and after it. Considering the huge number of homes that need to be rehabilitated in Spain and, in general, in many other parts of the world, if the energy efficiency commitments are to be met, the U-Value measure proves to be a key factor in this process.

Notwithstanding the foregoing, the current measure of U-Value based on available commercial devices is a tedious, time-consuming and costly process. On the other hand, the commercial equipment only allows to measure each time the value of the transmittance in a point, which can also carry, in the best case, several days by measurement. Consequently, if, as is normal, a rehabilitation action requires multiple measures, there are only two solutions: to use a very long time to carry out all the measures (they have to be sequential), which makes it a very impractical method; or to acquire as many equipment as necessary to be able to carry out them at the same time, which would surely imply an inabordable cost.

Con las limitaciones ya descritas en mente, se ha afrontado en este capítulo el desarrollo de una metodología de medida de la transmitancia térmica pensada para ser implementada con gran sencillez en obra. Así, se ha sustituido, mediante justificación matemático-física, la medida del flujo del calor a través de la estructura, por medidas de temperaturas en ambas caras de la misma. A continuación, se ha implementado un prototipo *hardware/software* que permite llevar a cabo la medida de U-*Value* mediante la metodología desarrollada, con una serie de ventajas adicionales respecto de los dispositivos actuales presentes en el mercado:

- Estructura modular, de modo que el equipo puede ser configurado, a partir de su realización más simple, en función de las necesidades del cliente. Esto abarata el equipo, ya que en todo momento su dimensión y capacidad se ajusta a los requerimientos de medidas.

- La conexión entre módulos no precisa cables, se realiza de forma inalámbrica y en modo conectar y funcionar (*plug and play*).

- Tiene una capacidad prácticamente ilimitada de tomar medidas simultáneas, con lo cual en unos pocos días puede llevar a cabo cientos de medidas de transmitancia.

- El medidor toma el valor de U-*Value* de forma automática y sin intervención del usuario, decidiendo cuándo la medida es correcta. No obstante, el usuario puede ajustar, en base a su experiencia, los parámetros más importantes del equipo.

- El medidor guarda en una memoria accesible por el usuario (memoria USB) los valores medidos, pero también envía éstos en tiempo real a través de internet.

- La interfaz de usuario con la que está dotado el equipo desarrollado, permite una forma muy fácil e intuitiva de obtener informes y gráficas.

With the limitations already described in mind, the development of a methodology for measuring the thermal transmittance designed to be implemented with great simplicity on site has been addressed in this chapter. Thus, by means of mathematical-physical justification, the measurement of the heat flow through the structure has been replaced by measurements of temperatures on both sides of the structure. Next, a hardware / software prototype has been implemented that allows carrying out the measurement of U-Value through the developed methodology, with a series of additional advantages with respect to the current devices present in the market:

- *Modular structure, so that the equipment can be configured, from its simplest realization, according to the needs of the customer. This lowers the equipment, since at all times its size and capacity conforms to the requirements of measures.*

- *The connection between modules does not require cables, is done wirelessly and plug and play mode.*

- *It has a virtually unlimited capacity to take simultaneous measurements, which in a few days can carry out hundreds of measures of transmittance.*

- *The meter takes the value of U-Value automatically and without user intervention, deciding when the measurement is correct. However, the user can adjust, based on his experience, the most important parameters of the equipment.*

- *The meter stores the measured values in a user accessible memory (USB memory), but also sends them in real time through the internet.*

- *The user interface with which the developed equipment is equipped, allows a very easy and intuitive way of obtaining reports and graphs.*

El capítulo 5 ha desarrollado la metodología que es hilo conductor de esta tesis: negociación, diseño, construcción y operación de edificios de consumo de energía mínimo en clima subtropical. La metodología desarrollada incluye todas las etapas del MEB, desde la negociación previa al comienzo de cualquier proyecto hasta la etapa final (una vez entregado y en servicio el edificio) de operación y mantenimiento. Entre ellas están, por orden secuencial, las etapas de negociación inicial, diseño arquitectónico, ingeniería de instalaciones, gestión de la construcción y mantenimiento.

La metodología desarrollada, dada su complejidad y permanencia en el tiempo, todo el ciclo de vida de un edificio, requería también de una metodología de trabajo que permitiera llevar a cabo de forma organizada todas las etapas. Esta exigencia, superaba en mucho a concepciones aisladas propias de construcción o instalaciones, que podrían ser cubiertas siguiendo métodos CAD tradicionales; se trataba en nuestro caso de poder disponer de una metodología de trabajo integrada. En este punto fue donde decidimos que el marco técnico de gestión de nuestra metodología debía ser el modelado de información para la edificación (BIM, building information modeling).

Atendiendo a la propia definición de BIM, se podría pensar que éste es un programa software. De hecho, se utiliza software dinámico de modelado de edificios en tres dimensiones y en tiempo real. Sin embargo BIM no es simplemente un programa software, es una metodología de trabajo integrada que se apoya, no en una, sino en múltiples herramientas basadas en tecnologías de la información. Es decir, que BIM no implica que toda la información de nuestro edificio está en un sólo archivo de un programa software, sino que toda la información, proveniente de n archivos generados por n programas software, bajo una metodología de procesos y procedimientos dentro de un equipo multidisciplinar, está conectada de manera inteligente con una relación bidireccional que permite su actualización en tiempo real.

Chapter 5 has developed the methodology that is the guiding thread of this thesis: negotiation, design, construction and operation of buildings of minimum energy consumption in subtropical climate. The methodology developed includes all phases of the MEB, from the negotiation prior to the start of any project to the final stage (once delivered and in service the building) of operation and maintenance. These include, in sequential order, the stages of initial negotiation, architectural design, facility engineering, construction management and maintenance.

The methodology developed, given its complexity and permanence in time, throughout the life cycle of a building, also required a work methodology that allowed to carry out in an organized way all the stages. This requirement far exceeded isolated conceptions of construction or facilities, which could be covered by traditional CAD methods; It was in our case to have an integrated work methodology. At this point it was where we decided that the technical management framework of our methodology should be information modeling for building (BIM, building information modeling).

Given the definition of BIM itself, one might think that this is just a computer software. In fact, dynamic building modeling software is used in three dimensions and in real time. However BIM is not simply a computer software, it is an integrated work methodology that is supported, not in one, but in multiple tools based on information technologies. That is, BIM does not imply that all the information in our building is in a single file of a software program, but that all information, coming from n files generated by n software programs, under a methodology of processes and procedures within a multidisciplinary team, is connected intelligently with a bidirectional relationship that allows its real-time updating.

Si bien BIM permite (y de hecho nos lo ha aportado en los proyectos llevados a cabo en esta tesis) la comunicación y comprensión del proyecto a través de su visualización en 3D (esto se puede llevar a cabo desde múltiples herramientas como *Allplan™*, *Archicad™*,, *Bentley™*, o *Revit™*, por ejemplo), quizás lo más importante es que integra de forma automática toda la documentación del proyecto. Cuando hablamos de toda la documentación nos referimos, no sólo a plantas, alzados, secciones, detalles y vistas 3D. Nos estamos refiriendo también a mediciones y presupuestos, estructuras, instalaciones, planificación, mantenimiento, comportamiento energético del edificio, etc.

En resumen, la metodología BIM facilita la pre construcción virtual del edificio anticipando la detección de interferencias, colisiones e incoherencias.

Pues bien, a partir de aquí, la metodología desarrollada ha sido hilvanada con BIM para, entre otras cosas, generar entregables del MEB en cada una de sus etapas o fases, lo cual permite llevar éstas de forma ordenada, estructurada y coordinada; y lo que es aún más importante, disponer de información objetiva sobre cada etapa para poder valorar el grado de cumplimiento de los requisitos planteados. Esto permite generar realimentaciones en la metodología que minimizan el error y que posibilitan garantizar que el MEB cumple con los requisitos de diseño.

Pero con nuestra metodología hemos ido aún más allá, ya que los requisitos de eficiencia energética los hemos llevado a todo el ciclo de vida del edificio, esto es, hay una vigilancia permanente, después de ser entregado el MEB, en su fase de usos y operación, de modo que la metodología proporciona información permanente referente al mantenimiento requerido y a una posible necesidad de rehabilitación en el tiempo. De hecho, la operación desde el BIM de la metodología desarrollada implica un entregable en forma de certificación anual de comportamiento energético del MEB.

Although BIM allows (and indeed has contributed to the projects carried out in this thesis) the communication and understanding of the project through its 3D visualization (this can be carried out from multiple tools like Allplan™, Archicad™, , Bentley™, or Revit™, for example), perhaps the most important thing is that it automatically integrates all project documentation. When we talk about all the documentation we refer, not only to plants, elevations, sections, details and 3D views. We are also referring to measurements and budgets, structures, facilities, planning, maintenance, energy performance of the building, etc.

In summary, the BIM methodology facilitates the virtual pre construction of the building anticipating the detection of interferences, collisions and inconsistencies.

Well, from here, the new methodology has been developed with BIM to, among other things, generate deliverables from the MEB in each of its stages or phases, which allows them to be carried out in an orderly, structured and coordinated manner; and what is even more important, have objective information on each stage in order to assess the degree of compliance with the requirements. This allows to generate feedback in the methodology that minimizes the error and that makes it possible to guarantee that the MEB meets the design requirements.

But with our methodology we have gone even further, since the requirements of energy efficiency have led to the entire life cycle of the building, that is, there is a permanent monitoring, after being delivered the MEB, in its use phase and operation, so that the methodology provides permanent information regarding required maintenance and a possible need for energy retrofitting over time. In fact, the operation from the BIM of the methodology developed implies a deliverable in the form of annual certification of energy performance of the MEB.

Como colofón al capítulo, se ha presentado el primer proyecto que ha sido llevado a cabo aplicando al completo la metodología MEB desarrollada en esta tesis. Se trata de una obra nueva, vivienda unifamiliar aislada, que nos ha permitido validar paso a paso y afinar la metodología desarrollada. Esta vivienda puede ser considerada la primera referencia para el diseño de edificios MEB en clima subtropical siguiendo la metodología desarrollada en esta tesis.

As a colophon of the chapter, it was presented the first project that has been carried out applying to the complete MEB methodology developed in this thesis. It is a new construction, isolated detached house, which has allowed us to validate step by step and optimize the methodology developed. This house can be considered the first reference for the design of buildings MEB in subtropical climate following the methodology developed in this thesis.

El capítulo 6 ha sido el último de aportaciones de la tesis. En él se ha puesto en valor la metodología desarrollada en el capítulo 5, pero ahora aplicada a la rehabilitación energética en la edificación. El capítulo 6 ha constituido un trabajo de investigación muy extenso y que, desde nuestro punto de vista, puede ser considerado un paradigma en la rehabilitación energética a nivel territorial.

Chapter 6 has been the last contribution of the thesis. In it, the methodology developed in chapter 5 has been put into value, but now applied to the energy rehabilitation in the building. Chapter 6 has been a very extensive research project and, from our point of view, can be considered a paradigm in energy retrofitting at the territorial level.

El desarrollo del capítulo coincide con el proyecto de investigación que ha financiado una buena parte de esta tesis: *Modelo de estrategia a Largo Plazo para Movilizar Inversiones en la Renovación del Parque Nacional de Edificios Residenciales en Andalucía Orientado al Ahorro de un 20% de Energía en Horizonte 2020* (EREBA2020), Referencia: G-GI3002/IDQ.

The development of the chapter coincides with the research project that has financed a good part of this thesis: Long-Term Strategy Model to Mobilize Investments in the Renovation of the National Park of Residential Buildings in Andalucia Oriented to Save 20% Energy in Horizon 2020 (EREBA2020), Reference: G-GI3002 / IDQ.

El objetivo del proyecto, cumplido en su totalidad, ha sido poner en manos de la administración, andaluza en este caso (Consejería de Fomento y Vivienda), un estudio analítico, refrendado por simulaciones y experimentación, de las posibilidades y costes de rehabilitación, del enorme parque de viviendas construido en Andalucía (centrado en las décadas de los 50, 60 y 70) previo a la entrada en vigor de la primera norma española, del año 1979, que tenía en cuenta la eficiencia energética en la edificación (NBE-CT-79). En concreto, en el capítulo 6, fruto del proyecto mencionado, se ponen de manifiesto los resultados siguientes:

The objective of the project, completed in its entirety, was to put into the hands of the Andalusian administration in this case (Ministry of Development and Housing), an analytical study, endorsed by simulations and experimentation, of the possibilities and costs of rehabilitation, the huge neighborhoods built in Andalusia (centered in the 50s, 60s and 70s) prior to the approval of the first Spanish standard code of 1979, which took into account energy efficiency in building (NBE-CT-79). In particular, in chapter 6, as a consequence of the mentioned project, the following results are shown:

- Han sido identificados en las 8 capitales andaluzas 372 polígonos de crecimiento correspondientes a las décadas 50, 60 y 70.

- *In the 8 Andalusian capitals, 372 growth polygons corresponding to the 50s, 60s and 70s have been identified.*

- Han sido identificados en las 8 capitales andaluzas 22.799 bloques de viviendas en los 372 polígonos de crecimiento correspondientes a las décadas 50, 60 y 70.

- Han sido identificados en las 8 capitales andaluzas 293.163 viviendas en los 22.799 bloques construidos en las décadas 50, 60 y 70.

- Han sido analizados 33 casos de actuaciones de rehabilitación en cada una de las capitales andaluzas. Esto ha proporcionado 264 casos para las 8 capitales andaluzas.

- A partir de los 264 casos analizados se ha propuesto una actuación de rehabilitación tipo para cada capital andaluza. En ella se indica el precio unitario medio por m2 de la rehabilitación propuesta para cada capital. El criterio ha sido la menor inversión que consigue un ahorro igual o superior al 20% que es el objetivo del Proyecto.

- Lo anterior ha permitido suministrar el coste, individualizado por capital, de la rehabilitación de los crecimientos correspondientes a las décadas de los años 50, 60 y 70 en las 8 capitales andaluzas.

Finalizar a plena satisfacción un proyecto del alcance al mencionado, ha requerido múltiples desarrollos parciales, sinérgicos y necesarios, los cuales se pueden resumir en los siguientes:

- Han sido geo localizados cartográficamente mediante SIG los crecimientos de las décadas estudiadas.

- Se ha realizado un trabajo de campo en la ciudad de Huelva que ha permitido documentar planimétricamente (accediendo a las viviendas para tomar medidas, previo permiso por escrito de sus propietarios), mediante fichas constructivas y de uso, 19 viviendas tipo pertenecientes a las décadas de los años 50, 60 y 70.

- Se ha analizado en estas viviendas la existencia de puentes térmicos mediante técnicas de termovisión.

- *In the 8 Andalusian capitals, 22,799 housing blocks have been identified in the 372 growth estates corresponding to the 50s, 60s and 70s.*

- *In the 8 Andalusian capitals, 293,163 houses have been identified in the 22,799 blocks built in the 50s, 60s and 70s.*

- *We have analyzed 33 cases of retrofitting in each of the Andalusian capitals. This has provided 264 cases for the 8 Andalusian capitals.*

- *From the 264 cases analyzed, a typical rehabilitation action has been proposed for each Andalusian capital. It indicates the average unit price per m^2 of the proposed rehabilitation for each capital. The criterion has been the lowest investment that achieves savings equal to or greater than 20% which is the objective of the Project.*

- *This has made it possible to supply the cost, individualized by capital, of the rehabilitation of the growth corresponding to the decades of the 50s, 60s and 70s in the 8 Andalusian capitals.*

Completing the scope project of the above mentioned, has required multiple partial, synergic and necessary developments, which can be summarized as follows:

- *The growth of the decades studied has been geographically located using GIS.*

- *A fieldwork has been carried out in the city of Huelva, which has made it possible to document planimetrically (entering the houses to take measures, prior written permission of its owners), through construction and use files, 19 type dwellings belonging to the decades of The 50s, 60s and 70s.*

- *The existence of thermal bridges has been analyzed in these houses using thermovision techniques.*

-

- Se ha desarrollado un sistema de información geográfica (SIG) del proyecto. Éste permite acceder al mismo en formato SIG por capas. Está accesible desde la WEB del proyecto para las 8 capitales andaluzas y, en el caso de Huelva, la capa más interna permite acceder a las fichas de las 19 viviendas estudiadas de forma pormenorizada.

- Se han rehabilitado, en diferente grado, 5 viviendas en la ciudad de Huelva.

- Se ha desarrollado (diseñado y construido) un sistema de instrumentación alámbrico que está actualmente montado en una de las viviendas rehabilitadas.

- Se ha desarrollado (diseñado y construido) un sistema de instrumentación inalámbrico que está actualmente montado en una de las viviendas rehabilitadas.

- Se ha desarrollado (diseñado y construido) un sistema de monitorización en red (cable, wifi y telefonía móvil). Las viviendas rehabilitadas están siendo monitorizadas en tiempo real y todos sus datos se reciben en los laboratorios del Grupo de Investigación *Control y Robótica* TEP 192.

- Se ha desarrollado (diseñado y construido) un software de monitorización de usuario, el cual permite que desde un ordenador, smartphone, tableta o cualquier otro dispositivo con conexión a red, el usuario pueda monitorizar su vivienda y saber en tiempo real el comportamiento de la misma respecto a confort y consumos eléctricos.

- Se ha desarrollado (diseñado y construido) una instalación de aerotermo + sistema solar térmico. Esto es una novedad en la producción doméstica de agua caliente sanitaria de forma renovable.

- *A geographic information system (GIS) of the project has been developed. This allows access in GIS format by layers. It is accessible from the web of the project for the 8 Andalusian capitals and, in the case of Huelva, the innermost layer allows access to the tiles of the 19 houses studied in detail.*

- *They have been retrofitted, in different degree, 5 houses in the city of Huelva.*

- *A wired instrumentation system that is currently installed in one of the retrofitted houses has been developed (designed and built).*

- *A wireless instrumentation system has been developed (designed and built) that is currently mounted in one of the rehabilitated dwellings.*

- *A network monitoring system (cable, wifi and mobile telephony) has been developed (designed and built). The retrofitted houses are being monitored in real time and all their data are received in the laboratories of the TEP 192 Control and Robotics Research Group.*

- *User monitoring software has been developed (designed and built), which allows a user to monitor their home and to know in real time the behavior of the user from a computer, smartphone, tablet or other device with a network connection. And the same regarding user's comfort and electrical consumption.*

- *It has developed (designed and built) an installation of an air-heat pump + solar thermal system for hot water. This is a novelty in the domestic production of sanitary hot water in a renewable way.*

- Se ha desarrollado (diseñado y construido) un sistema de supervisión y mantenimiento *online* de las instalaciones de energía renovable de las viviendas rehabilitadas. Este sistema consta de sensorística e instrumentación patentada por el Grupo de Investigación, y suministra datos en tiempo real del funcionamiento individualizado de cada una de las instalaciones a nivel de componentes (cada panel fotovoltaico por ejemplo) a los laboratorios del Grupo de Investigación *Control y Robótica* TEP 192. Esto permite detectar *online* la avería o mal funcionamiento de cualquier elemento de la instalación.

- Se ha caracterizado el consumo energético de las viviendas, dependiendo de los requerimientos y su ubicación.

- Se ha diseñado e implementado una página WEB del proyecto donde pueden ser consultados todos los resultados del mismo (http://uhu.es/ereba2020/). Es especialmente llamativa toda la planimetría de las 8 capitales andaluzas ordenadas por décadas de crecimiento urbano. También todos los detalles de las obras de rehabilitación llevadas a cabo, etc. En suma pensamos que es un magnífico portal no solo para mostrar y demostrar a la opinión pública el gran trabajo realizado en el proyecto, sino también para ser usado como ejemplo y herramienta de consulta, análisis y aprendizaje para técnicos, estudiosos e investigadores.

- *An online supervision and maintenance system for the renewable energy facilities of the retrofitted houses has been developed (designed and built). This system consists of sensorisation and instrumentation patented by the Research Group, and provides real-time data of the individualized operation of each component-level facility (each photovoltaic panel for example) to the laboratories of the Control and Robotics Research Group TEP 192. This allows to detect online the malfunction of any element of the system.*

- *The energy consumption of the dwellings has been characterized, depending on the requirements and their location.*

- *A web page of the project has been designed and implemented where all the results of the project can be consulted (http://uhu.es/ereba2020/). The planimetry of the 8 Andalusian capitals ordered by decades of urban growth is especially striking. Also all the details of the retrofit works carried out, etc. In short, we think it is a great portal not only to show and demonstrate to the public the great work done in the project, but also to be used as an example and tool for consultation, analysis and learning for technicians, scholars and researchers.*

7.2 DESARROLLOS FUTUROS / *FUTURE DEVELOPMENTS*

Lejos de considerar esta tesis como un trabajo de investigación cerrado, los capítulos que la conforman han terminado siendo puertas abiertas hacia trabajos de investigación futuros.

Quizás el más ambicioso es el que atañe al Grupo de Investigación *Control y Robótica* TEP 192, al que pertenece el doctorando, y que ha dado soporte de ingeniería y parte del económico a esta tesis. La línea de investigación de eficiencia energética en la edificación es la más joven del Grupo, y es de esperar que esta tesis y sus resultados supongan el afianzamiento de la misma. De hecho, al igual que el resto de líneas de investigación del Grupo, es un objetivo de ésta contar con su propio laboratorio, medios y personal. Para ello, una vez alcanzados resultados en forma de publicaciones de prestigio derivadas de la tesis, se pretende concurrir a convocatorias de proyectos y a contratos con empresas, de modo que la financiación necesaria para el objetivo marcado pueda ser obtenida en el menor tiempo posible. Esta es una tarea a la que este doctorando se va a poner manos a la obra de manera inmediata, de la mano del Director del Grupo y Director de esta tesis. Estamos convencidos que los frutos científico-técnicos de esta tesis son de gran interés, tanto para el sector empresarial como para las administraciones. Hay muchas inversiones (necesarias) en juego y una gran capacidad de crear riqueza.

Otra puerta que deja abierta a la investigación esta tesis, es la referente a la potencia y necesidad de que en la eficiencia energética en la edificación trabajen equipos multidisciplinares. Si bien es posible que en obra nueva el equipo de trabajo pueda circunscribirse a profesionales en el ámbito de la arquitectura e ingeniería, en rehabilitación por supuesto que no, ya que las aristas del problema a resolver son todavía más numerosas.

Far from considering this thesis as a closed research, the chapters that comprise it have ended up opening doors towards future research works.

Perhaps the most ambitious is the one that concerns the Control and Robotics Research Group TEP 192, to which the doctorate belongs, and which has given engineering support and part of the economic to this thesis. The research line of energy efficiency in building is the youngest in the Group, and it is to be hoped that this thesis and its results will lead to its consolidation. In fact, like the rest of the research lines of the Group, its objective is to have its own laboratory, media and personnel. To achieve this, once results have been achieved in the form of prestigious publications derived from the thesis, it is intended to attend calls for projects and contracts with companies, so that the necessary funding for the target can be obtained in the shortest possible time. This is a task to which this doctorate is going to get to work immediately, with the help of the Group Director and Director of this thesis. We are convinced that the scientific-technical results of this thesis have great interest, both for the business sector and for the administrations. There are many (necessary) investments in play and a great ability to create wealth.

Another door that leaves open the investigation developed in this thesis, is the one referring to the power and necessity that in the buildings energy efficiency must work in multidisciplinary teams. Although it is possible that in new constructions the work team can be limited to professionals in the field of architecture and engineering, in rehabilitation of course not, since the edges of the problem to be solved are even more numerous.

Pensemos sólo en el reto que supone rehabilitar viviendas sociales en barrios empobrecidos. A los técnicos (arquitectos e ingenieros), les atañe la solución de una parte del problema, pero para el resto son imprescindibles sociólogos, trabajadores sociales, educadores, etc. De poco vale invertir en rehabilitar una vivienda para alcanzar un determinado grado de eficiencia energética, si sus usuarios (parte y solución del problema) no saben cómo contribuir al buen desempeño global, haciendo el mejor uso (más apropiado) de ella.

Let's think only of the challenge of rehabilitating social housing in impoverished neighborhoods. Technicians (architects and engineers) are concerned with solving part of the problem, but for the rest, sociologists, social workers, educators, etc., are essential. It is not worth investing in retrofitting a home to achieve a certain degree of energy efficiency, if its users (part and solution of the problem) do not know how to contribute to good overall performance, making the best use (more appropriate) of it.

Para rehabilitaciones de edificios históricos, por ejemplo, será necesario integrar dentro del equipo multidisciplinar a historiadores, geógrafos, especialistas en bellas artes, etc. Si pensamos en rehabilitaciones energéticas en hospitales, escuelas, geriátricos, etc., habría que contar con personal médico y asistencial, maestros, sicólogos, etc. En definitiva, el equipo de arquitectos e ingenieros ha de trabajar siempre ligado al entorno (social, profesional, cultural, económico, etc.) en el que se enmarca la rehabilitación. Sólo así, el trabajo científico-técnico será algo más que números, constituirá también una adecuación a lo que usuarios y sociedad en general requieren.

In case of historical buildings retrofitting, fit will be necessary to integrate historians, geographers, fine arts specialists, etc., into the multidisciplinary team. If we think about energy retrofitting in hospitals, schools, geriatrics, etc., we would have to count on medical and medical personnel, teachers, psychologists, etc. In short, the team of architects and engineers has to work always linked to the environment (social, professional, cultural, economic, etc.) in which the rehabilitation is framed. Only thus, the scientific-technical work will be more than numbers, will also be an adaptation to what users and society in general require.

Continuando con puertas genéricas de investigación que esta tesis deja abiertas, debemos entrar en el ámbito específico de la instrumentación y el control; con sistemas *hardware/software* que van mucho más allá de la domótica tradicional, y cuyo cometido es el de justificar actuaciones, velar por la calidad de realización de las mismas, garantizar la idoneidad técnica económica de lo hecho, y vigilar porque el uso y la evolución de la actuación mantenga con el paso del tiempo los requerimientos establecidos.

Continuing with generic fields of research that this thesis leaves open, we must enter in the specific scope of the instrumentation and the control; with hardware / software systems that go well beyond traditional home automation, and whose purpose is to justify actions, ensure the quality of the performance of the same, ensure the economic technical suitability of what is done, and monitor because the use and evolution of the performance maintains with the passage of time the established requirements.

Podemos decir sin ambages que, en general, se ha medido (instrumentado) muy poco en la edificación, al menos en España. Resulta, desde nuestro punto de vista, cuando menos arriesgado, las cuantiosas inversiones en rehabilitación energética llevadas hasta la fecha por las diferentes administraciones, sin que se tengan pruebas fehacientes del ahorro energético conseguido.

We can say without ambiguity that, in general, it has been measured (instrumented) very little in the building, at least in Spain. It is, from our point of view, very risky, because the large investments in energy retrofitting carried out to date by the different administrations, without having reliable evidence of the energy savings achieved.

En el trabajo de investigación desarrollado en esta tesis doctoral hemos tenido ocasión de comprobar cómo actuaciones de muy bajo coste (corregir infiltraciones de aire durante el desarrollo de un test de estanqueidad por ejemplo), consiguen mejoras de la eficiencia energética del edificio mucho mayores, y a menor precio, que determinados tipos de SATE o sustituciones de carpinterías. Sin embargo y en general, este análisis previo no ha sido implementado en sus actuaciones por la Administración, quizás por la falta de formación específica de sus técnicos, y quizás también por tener catalogadas una serie de actuaciones tipo a modo de recetas, que se pretenden hacer pasar por válidas para cualquier casuística, lo cual evidentemente supone un gran error, grave y dicho sea de paso, muy caro.

In the research work developed in this doctoral thesis we have been able to verify how very low cost actions (correcting air infiltrations during the development of a BDT test for example), achieve much greater improvements in terms of energy efficiency of the building, and lower price, than certain types of ETICs or substitutions of frames and glass. However, in general, this previous analysis has not been implemented in its actions by the Administration, perhaps due to the lack of specific training of its technicians, and perhaps also to have cataloged a series of type actions as a recipe, which are intended forced to be valid for any case, which obviously supposes a great error, serious and, unfortunately, very expensive.

En resumen, es preciso instrumentar las edificaciones antes y después de la rehabilitación. Sólo así podrán ser confirmadas deficiencias detectadas inicialmente, así como justificar inversiones gracias a que la mejora sobre el rendimiento inicial ha podido ser medida con la debida exactitud. Sin embargo, este trabajo de investigación ha puesto de manifiesto también la escasez de instrumental profesional disponible que resuelva los problemas concretos que se plantean en la eficiencia energética en la edificación. Por tanto, el campo de la instrumentación y control está por desarrollar en gran medida en este ámbito.

In short, it is necessary to use instrumentation and data analysis in buildings before and after retrofit them. This is the only way to confirm weaknesses detected initially and to justify investments, because the improvement over the initial performance can be measured with the correct accuracy. However, this research has also revealed the shortage of available professional instruments that solve the specific problems that arise in the energy efficiency in the building. Therefore, the field of instrumentation and control is still to be developed in this area.

Pormenorizando ahora por capítulos, la VLEGE es una forma de energía renovable de enormes posibilidades y muy poco estudiada e implementada en clima subtropical. Sin embargo y desde nuestro punto de vista, esta tesis ha abierto una línea de investigación en este sentido, cuyo futuro es muy prometedor. Cuando se habla de edificios MEB y, en concreto ZEB o +ZEB, ha de considerarse que para llegar a estas categorías de eficiencia energética, se precisa un conjunto de medidas y sistemas trabajando de forma integrada. Así, el primer objetivo a cumplir es el de conseguir que con criterios pasivos (actuando fundamentalmente sobre la envolvente), el edificio reduzca drásticamente su demanda de energía para un grado de confort dado.

The VLEGE is a form of renewable energy of enormous potential and very little studied and implemented in subtropical climates. However, and from our point of view, this thesis has opened a line of research in this sense, whose future is very promising. When talking about MEB buildings, and in particular ZEB or + ZEB, it must be considered that in order to reach these categories of energy efficiency, a set of measures and systems are needed in an integrated way. Thus, the first objective is to achieve that with passive criteria (acting primarily on the envelope), the building drastically reduces its energy demand for a given degree of comfort.

Por supuesto, casi siempre será imprescindible (al menos en las épocas del año más exigentes) un suplemento energético para lograr el confort deseado, y es aquí donde la VLEGE puede jugar un papel primordial. Tiene aún más sentido en clima subtropical, porque la temperatura media anual en estas zonas del planeta, sobre todo si están atemperadas por la influencia de su cercanía al mar, entran directamente en lo que es la ventana del confort térmico (piénsese por ejemplo en la capital de Huelva, donde la temperatura media anual es de 20 ºC). Consecuentemente, confiriendo a la VLEGE el mantenimiento del confort térmico, interior el resto de sistemas de energía renovable (fotovoltaico, micro eólico y ACS por lo general) pueden estar dedicados a garantizar el suministro eléctrico del edificio e incluso, a que pueda actuar como centro de micro generación (+ZEB).

En virtud de lo anterior, esta tesis deja encauzado el camino para que la línea de eficiencia energética en la edificación del Grupo de Investigación profundice en el diseño, dimensionado y operación de sistemas VLEGE aplicados a clima subtropical.

Ahora, respecto a la medida de la transmitancia térmica en la edificación (U-*Value*), esta tesis ha demostrado lo poco prácticos que resultan los equipos de medida disponibles actualmente en el mercado. Por este motivo, y por la importancia de la determinación de esta variable para la mejora de la eficiencia energética de la rehabilitación de edificios, se ha propuesto una nueva metodología, así como el diseño y la construcción de un nuevo equipo medidor.

Esto tiene una importancia crucial en el ámbito de la eficiencia energética en la edificación. No hemos dejado de incidir en este trabajo de investigación en que la primera prioridad de actuación debe ser sobre la envolvente térmica y, precisamente, el éxito de esta actuación radica en reducir al máximo la transmitancia (según posibilidades técnicas y económicas), pero esto, lógicamente, debe ser comprobado, tanto antes de actuar como después. Consecuentemente, la medida de la transmitancia térmica es fundamental.

Of course, it will almost always be essential (at least in the most demanding times of the year) an energy supplement to achieve the desired comfort, and this is where the VLEGE can play a primordial role. It makes even more sense in subtropical climate, because the average annual temperature in these areas of the planet, especially if they are tempered by the influence of its proximity to the sea, enter directly into what is the window of thermal comfort (think for example in the Capital of Huelva, where the average annual temperature is 20 ºC). Consequently, by giving the VLEGE the maintenance of thermal comfort, the rest of renewable energy systems (photovoltaic, micro wind and ACS in general) can be dedicated to guarantee the electrical supply of the building and even, that can act as a center Of micro generation (+ ZEB).

Based on the above, this thesis guides the way for the line of energy efficiency in the construction of the Research Group to deepen the design, dimensioning and operation of VLEGE systems applied to subtropical climate.

Now, with respect to the measurement of the thermal transmittance in the building (U-Value), this thesis has shown how impractical the measurement equipments that are currently available in the market are. For this reason, and for the importance of the determination of this variable for the improvement of the energy efficiency of the rehabilitation of buildings, a new methodology has been proposed, as well as the design and construction of a new metering equipment.

This has a crucial importance in the field of energy efficiency in building. We have not stopped influencing this research work that the first priority of action must be on the thermal envelope and precisely the success of this action lies in reducing transmittance to the maximum (according to technical and economic possibilities); but this, logically, must be checked, both before and after. Consequently, the measurement of the thermal transmittance is fundamental.

¿Qué toca ahora? Pues, en primer lugar, poner a punto el sistema desarrollado con mucha más experimentación de la llevada a cabo hasta hoy. Es más, tenemos el objetivo, si conseguimos presupuesto para ello, de poder realizar decenas, o mejor aún, cientos de medidas de transmitancia de forma simultánea, algo que hasta donde alcanza nuestro conocimiento, nunca se ha realizado.

Más aún, con la metodología desarrollada hemos demostrado que no es necesario llevar a cabo engorrosas y caras medidas directas de transmisión de calor, y también con la metodología desarrollada hemos demostrado que podemos acortar el tiempo de medida (sobre todo si se precisan muchas en muy poco tiempo). Sin embargo, estamos convencidos, y en ello estamos trabajando ya, de que probablemente tampoco sea estrictamente imprescindible llevar a cabo medidas de temperatura y, sobretodo, que quizás las medidas de transmitancia térmica puedan realizarse en mucho menos tiempo empleando otras variables físicas. Esto supondría un salto cualitativo y cuantitativo enorme en la medida del factor U-*Value* en la edificación. No vamos a desarrollar más este punto aquí, porque es probable que esta línea abierta nos lleve a una propuesta de patente, y en esa dirección estamos trabajando actualmente.

Centrándonos ahora en las puertas de investigación que dejan abiertas los capítulos 5 y 6, éstos son los auténticos campos de experimentación de todos los desarrollos llevados a cabo en esta tesis. En obra nueva (capítulo 5), es preciso poner a prueba la metodología en diferentes tipos de viviendas: unifamiliar aislada, pareados, adosados y edificios completos, e incluso agrupaciones de ellos compartiendo recursos. Por supuesto, están también los edificios de uso no residencial. La casuística, posibilidades y capacidad de inversión económica de cada caso, estamos convencidos que nos llevará a mejorar y perfeccionar la metodología propuesta en esta tesis, de modo que cumpla verdaderamente con su concepción original, esto es, ser un marco general válido para cualquier construcción de nueva planta.

What is the next? Well, first, fine-tuning the developed system with much more experimentation than carried out until today. What's more, we have the objective, if we can budget for it, to be able to do tens, or better yet, hundreds of measurements of transmittance simultaneously, something to the best of our knowledge, has never been realized.

Moreover, with the developed methodology we have demonstrated that it is not necessary to carry out cumbersome and costly direct measures of heat transfer, and also with the methodology developed we have demonstrated that we can shorten the measurement time (especially if many are needed in very little time). However, we are convinced, and we are already working on this, that it is probably not strictly necessary to carry out measurements of temperature and, above all, that measures of thermal transmittance can be carried out in much less time using other physical variables. This would imply a huge qualitative and quantitative leap in the measure of the U-Value factor in the building. We will not further develop this point here, because this open research line is likely to lead to a patent proposal, and in that direction we are currently working.

Focusing now on the research lines that open chapters 5 and 6, these are the real fields of experimentation of all the developments carried out in this thesis. In a new work (chapter 5), it is necessary to test the methodology in different types of dwellings: isolated single family houses, semi-detached houses, and multi-family buildings, and even groups of them sharing resources. Of course, there are also non-residential buildings. The casuistry, possibilities and economic investment capacity of each case, we are convinced that it will lead us to improve and perfect the methodology proposed in this thesis, so that it truly fulfills its original conception, that is, to be a general framework valid for any new construction.

Si la obra nueva deja múltiples líneas de investigación abiertas, no digamos ya la rehabilitación. Si alguna enseñanza hemos aprendido como consecuencia del trabajo de campo desarrollado en esta tesis, es que cada rehabilitación es única. Esta afirmación requiere obviamente una aclaración, y es que nos referimos a rehabilitación con grado de exigencia a nivel de vivienda, y con grado de actuación acorde con él. En efecto, salvo que pudiéramos encontrar dos viviendas exactamente iguales en todo, también en su ocupación, uso y presupuesto disponible, no podemos esperar, y de hecho sería un error, que los resultados en una vivienda coincidan con los de otra. Esto, referido a viviendas, es extrapolable a otros edificios con usos diferentes al residencial.

Según lo anterior, el campo de la rehabilitación energética en la edificación, abre un abanico de posibilidades extraordinarias para la investigación y la formación de profesionales expertos en este ámbito. Y si experto proviene de experiencia, debemos concluir que éstos son prácticamente inexistentes a día de hoy, al menos hasta donde hemos podido contactar en nuestras múltiples interacciones con Colegios profesionales de Arquitectos, Aparejadores e Ingenieros. También con técnicos de las diferentes Administraciones públicas involucradas y Empresas. Es más, bajando niveles de calificación técnica, podríamos llegar hasta el nivel de los operarios responsables de la ejecución material de las distintas partidas de obra. Esto, aunque pueda parecer fuera de lugar en una tesis doctoral, no es más que consecuencia y fiel reflejo de nuestra propia experiencia. Y es que en la persecución del debido rigor y control de ejecución de la obra de rehabilitación energética desarrollada en esta tesis hemos tenido que formar en obra a operarios de empresas constructoras en la forma de aplicar determinadas técnicas de sellar adecuadamente el perímetro de una carpintería, por ejemplo. En este punto, es preciso hacer hincapié sobre ello. Si los técnicos responsables de los proyectos no están al día de las últimas tecnologías, y los operarios tampoco, está claro que hay una vía abierta de necesidad de formación especializada que solo muy pocos expertos pueden llevar a cabo. Por tanto, aquí hay un nicho claro de trabajo por desarrollar.

If the new construction leaves multiple research lines open, then retrofitting even more. If anything we have learned as a consequence of the fieldwork developed in this thesis, is that each retrofit is unique. This statement obviously requires clarification, and we are referring to retrofitting with a degree of demand at the level of housing, and with degree of performance in accordance with it. Indeed, unless we could find two houses exactly alike in everything, also in their occupation, use and available budget, we can not expect, and indeed would be a mistake, that the results in one dwelling coincide with those of another. This, referring to houses, is transferable to other buildings with different uses to the residential.

In light of the above, the field of energy retrofitting in buildings opens a range of extraordinary possibilities for research and training of experts. And if the expert comes from experience, we must conclude that these are practically nonexistent to this day, at least as far as we have been able to contact in our many interactions with Architects and Engineers Associations. Also with technicians of the different public Administrations involved and Corporations. Moreover, lowering levels of technical qualification, we could reach the level of the operators responsible for the material execution of the different work items. This, although it may seem out of place in a doctoral thesis, is nothing more than a consequence and a faithful reflection of our own experience. Seeking the proper rigor and control of the execution of the energy retrofit construction works developed in this thesis, we have had to train construction companies workers in the form of applying certain techniques to properly seal the perimeter of a carpentry, for example. At this point, it is necessary to emphasize this. If the technicians responsible for the projects are not up-to-date with the latest technologies, and the operators who have to carry out the actions either, it is clear that there is an open path of need for specialized training that only very few experts can carry out . So here is a clear niche of work to be developed.

Abandonando el plano formativo y volviendo al científico-técnico, esta tesis doctoral deja abiertas diferentes líneas de investigación en lo que a rehabilitación energética se refiere, tanto desde el punto de vista de la arquitectura, como de la ingeniería. Así, es preciso aplicar la metodología desarrollada a edificios con usos muy diferentes (en los dos casos descritos en los capítulo 5 y 6 ha sido aplicada a viviendas), con pretensiones también muy diferentes, así como con grados de actuación y presupuesto también muy diferentes. Sólo así, y fruto de nuestra propia experiencia, podremos proponer la metodología desarrollada como un estándar. Quién sabe si quizás algún día, ese es nuestro objetivo y para ello continuamos trabajando, uno de los estándares de certificación energética en la edificación, tanto de obra nueva como rehabilitada, provenga de la Universidad de Huelva, y en concreto de nuestro Grupo de Investigación.

Abandoning the training plan and returning to the scientific-technical, this doctoral thesis leaves open different research lines referred to energy retrofitting and new MEB, both from the point of view of architecture and engineering. Thus, it is necessary to apply the methodology developed to buildings with very different uses (in the two cases described in Chapter 5 and 6 has been applied to houses), with also very different pretensions, as well as very different degrees of performance and budget. Only thus, and from our own experience, we can propose the methodology developed as a standard. Who knows if maybe someday, that is our goal and for this are continue working, one of the energy certification standards in building, both for new and retrofitting construction works, come from the University of Huelva, and specifically our Research Group .


Contribuciones desde la Arquitectura y la Ingeniería a los edificios de energía mínima
TESIS DOCTORAL
Anexos

ANEXOS

ANEXOS AL CAPÍTULO 6

6.1.1 Análisis capitales andaluzas por décadas

6.1.2 Fichas de crecimientos urbanos y viviendas

6.1.3 Medidas de transmitancias, radiación térmica y estanqueidad

6.3.1 Análisis de componentes

6.3.2 Análisis de combinaciones factibles

6.3.3 Estudios previos por capitales

6.3.4 Análisis de reducción de la demanda

6.3.5 Análisis del presupuesto por actuación

6.3.6 Resultados por capitales

6.3.7 Resultados por tipos

6.3.8 Entrada de datos de simulación

6.4.1 Rehabilitación energética de la envolvente

6.4.2 Configuración de la instalación eléctrica

6.4.3 Sistemas integrados de energías renovables

6.4.4 Sistemas activos de alta eficiencia

6.5.1 Instrumentación desarrollada

6.5.2 Datos en tiempo real

6.6.1 Periodos de amortización

6.7.1 Permisos de los propietarios para el acceso a sus viviendas

6.7.2 Convenios de colaboración con empresas

6.7.3 Facturas de consumo eléctrico en viviendas


Contribuciones desde la Arquitectura y la Ingeniería a los edificios de energía mínima
TESIS DOCTORAL
Referencias

REFERENCIAS

1. Europeo, P.y.C., Directiva (UE) 2012/27/UE. 2012.
2. TEP192, R.G. *http://energiarenovable.uhu.es/scada/bcarmen*. 2015 [cited 2017 02/28/2017]; Available from: http://energiarenovable.uhu.es/scada/bcarmen.
3. Europea, C., Recomendación (UE) 2016/1318. 2016.
4. Clarke, J.A., et al., Integrated modelling of low energy buildings. Renewable Energy, 1998. **15**(1-4): p. 151-156.
5. Ochoa, C.E. and I.G. Capeluto, Strategic decision-making for intelligent buildings: Comparative impact of passive design strategies and active features in a hot climate. Building and Environment, 2008. **43**(11): p. 1829-1839.
6. Aelenei, L., et al., Design issues for net zero-energy buildings. Open House International, 2013. **38**(3): p. 7-14.
7. Karteris, M. and A.M. Papadopoulos, Residential photovoltaic systems in Greece and in other European countries: A comparison and an overview. Advances in Building Energy Research, 2012. **6**(1): p. 141-158.
8. Zhou, D., C.Y. Zhao, and Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Applied Energy, 2012. **92**: p. 593-605.
9. Gunay, H.B., W. O'Brien, and I. Beausoleil-Morrison, A critical review of observation studies, modeling, and simulation of adaptive occupant behaviors in offices. Building and Environment, 2013. **70**: p. 31-47.
10. Soares, N., et al., Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency. Energy and Buildings, 2013. **59**: p. 82-103.
11. Ponmalar, V. and B. Ramesh, Energy efficient building design and estimation of energy savings from daylighting in Chennai. Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering, 2014. **111**(4): p. 59-80.
12. Aflaki, A., et al., A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. Energy and Buildings, 2015. **101**: p. 153-162.
13. Eurostat, Energy, transport and environment indicators. Eurostat, ed. E. Pocketbooks. 2014.
14. Mathur, V.K. and I. Chand, *Climatic design for energy efficiency in buildings.* Journal of the Institution of Engineers (India): Architectural Engineering Division, 2003. **84**(2 OCT.): p. 33-39.
15. Mohareb, E.A., et al., Decoupling of building energy use and climate. Energy and Buildings, 2011. **43**(10): p. 2961-2963.
16. Naamandadin, N.A., A.R. Sapian, and S.N.A.M. Noor, Site planning and orientation for energy efficiency: A comparative analysis on three office buildings in Kuala Lumpur to determine a location for building shading device, in Key Engineering Materials. 2016. p. 247-255.
17. Singh, M.K., S. Mahapatra, and S.K. Atreya, Solar passive features in vernacular architecture of North-East India. Solar Energy, 2011. **85**(9): p. 2011-2022.
18. Song, Y., et al. A comparative investigation on sustainable strategies of vernacular buildings and modern buildings in southwest China. in Proceedings - 28th International PLEA Conference on Sustainable Architecture + Urban Design: Opportunities, Limits and Needs - Towards an Environmentally Responsible Architecture, PLEA 2012. 2012.
19. Gokarakonda, S. and A. Kumar, Passive Architectural Design Index applied to vernacular and passive buildings. International Journal of Environmental Studies, 2016. **73**(4): p. 563-572.
20. Ivanović-Šekularac, J.A., J.L. Čikić Tovarović, and N.D. Šekularac, Restoration and conversion to re-use of historic buildings incorporating increased energy efficiency: A case study - the haybarn complex, hilandar monastery, Mount Athos. Thermal Science, 2016. **20**(4): p. 1363-1376.
21. Martínez-Molina, A., et al., Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **61**: p. 70-85.
22. Montalbán Pozas, B. and F.J. Neila González, Hygrothermal behaviour and thermal comfort of the vernacular housings in the Jerte Valley (Central System, Spain). Energy and Buildings, 2016. **130**: p. 219-227.

23. Farzam, S. and G. Todesco, Sustainability in cold climates. ASHRAE Journal, 2010. **52**(1): p. 20-28.
24. Jin, H. and B.C. Zhao, *Design strategy of low carbon building in cold region.* Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2011. **18**(SUPPL.2): p. 17-20.
25. Olofsson, T. and T.M.I. Mahlia, Modeling and simulation of the energy use in an occupied residential building in cold climate. Applied Energy, 2012. **91**(1): p. 432-438.
26. Zhou, Z., et al., Phase change materials for solar thermal energy storage in residential buildings in cold climate. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **48**: p. 692-703.
27. Hamilton, I.G., et al., Energy efficiency uptake and energy savings in English houses: A cohort study. Energy and Buildings, 2016. **118**: p. 259-276.
28. Richman, R. and R. Simpson, Towards quantifying energy saving strategies in big-box retail stores: A case study in Ontario (Canada). Sustainable Cities and Society, 2016. **20**: p. 61-70.
29. Wang, Q., et al., Ventilation heat recovery jointed low-temperature heating in retrofitting - An investigation of energy conservation, environmental impacts and indoor air quality in Swedish multifamily houses. Energy and Buildings, 2016. **121**: p. 250-264.
30. Taleb, H.M. and S. Sharples, Developing sustainable residential buildings in Saudi Arabia: A case study. Applied Energy, 2011. **88**(1): p. 383-391.
31. Budaiwi, I.M., A.A. Abdou, and M.S. Al-Homoud, Envelope retrofit and air-conditioning operational strategies for reduced energy consumption in mosques in hot climates. Building Simulation, 2013. **6**(1): p. 33-50.
32. Aldossary, N.A., Y. Rezgui, and A. Kwan, Domestic energy consumption patterns in a hot and humid climate: A multiple-case study analysis. Applied Energy, 2014. **114**: p. 353-365.
33. Kwong, Q.J., N.M. Adam, and B.B. Sahari, Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review. Energy and Buildings, 2014. **68**(PARTA): p. 547-557.
34. Mohamed, A., A. Hasan, and K. Sirén, Fulfillment of net-zero energy building (NZEB) with four metrics in a single family house with different heating alternatives. Applied Energy, 2014. **114**: p. 385-399.
35. AlAjmi, A., H. Abou-Ziyan, and A. Ghoneim, Achieving annual and monthly net-zero energy of existing building in hot climate. Applied Energy, 2016. **165**: p. 511-521.
36. Saber, E.M., K.W. Tham, and H. Leibundgut, A review of high temperature cooling systems in tropical buildings. Building and Environment, 2016. **96**: p. 237-249.
37. Qahtan, A., et al., Experimental determination of thermal performance of glazed façades with water film, under direct solar radiation in the tropics. Building and Environment, 2011. **46**(11): p. 2238-2246.
38. Kong, X., et al., Research on the energy performance and indoor environment quality of typical public buildings in the tropical areas of China. Energy and Buildings, 2012. **48**: p. 155-167.
39. Chow, S.K.H., et al., Analysis and prediction of daylighting and energy performance in atrium spaces using daylight-linked lighting controls. Applied Energy, 2013. **112**: p. 1016-1024.
40. Zhang, T., et al., Performance analysis of the air-conditioning system in Xi'an Xianyang International Airport. Energy and Buildings, 2013. **59**: p. 11-20.
41. Zhang, T., et al., On-site measurement and performance optimization of the air-conditioning system for a datacenter in Beijing. Energy and Buildings, 2014. **71**: p. 104-114.
42. Hong, T., et al., A review on sustainable construction management strategies for monitoring, diagnosing, and retrofitting the building's dynamic energy performance: Focused on the operation and maintenance phase. Applied Energy, 2015. **155**: p. 671-707.
43. Lin, B., et al., Investigation of winter indoor thermal environment and heating demand of urban residential buildings in China's hot summer - Cold winter climate region. Building and Environment, 2016. **101**: p. 9-18.
44. Dong, B., Z. O'Neill, and Z. Li, A BIM-enabled information infrastructure for building energy Fault Detection and Diagnostics. Automation in Construction, 2014. **44**: p. 197-211.
45. Eguaras-Martínez, M., M. Vidaurre-Arbizu, and C. Martín-Gómez, Simulation and evaluation of building information modeling in a real pilot site. Applied Energy, 2014. **114**: p. 475-484.

46. Wong, J.K.W. and K.L. Kuan, Implementing 'BEAM Plus' for BIM-based sustainability analysis. Automation in Construction, 2014. **44**: p. 163-175.
47. Ham, Y. and M. Golparvar-Fard, Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling. Automation in Construction, 2015. **49**: p. 214-224.
48. Kim, J.B., et al., Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation. Automation in Construction, 2015. **50**(C): p. 16-28.
49. Rahmani Asl, M., et al., BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization. Energy and Buildings, 2015. **108**: p. 401-412.
50. Zhang, J., B.C. Seet, and T.T. Lie, Building information modelling for smart built environments. Buildings, 2015. **5**(1): p. 100-115.
51. Guo, S.J. and T. Wei, Cost-effective energy saving measures based on BIM technology: Case study at National Taiwan University. Energy and Buildings, 2016. **127**: p. 433-441.
52. Jiang, Y., et al., An analysis of BIM web service requirements and design to support energy efficient building lifecycle. Buildings, 2016. **6**(2).
53. Ladenhauf, D., et al., Computational geometry in the context of building information modeling. Energy and Buildings, 2016. **115**: p. 78-84.
54. Pedrini, A. and S. Szokolay. The architects approach to the project of energy efficient office buildings in warm climate and the importance of design methods. in IBPSA 2005 - International Building Performance Simulation Association 2005. 2005.
55. Donn, M., S. Selkowitz, and B. Bordass, *The building performance sketch.* Building Research and Information, 2012. **40**(2): p. 186-208.
56. Mingucci, R., S. Garagnani, and S. Cinti Luciani, CAD versus BIM: The evolution of acronyms or a revolution in the world of design?, in Disegnare Idee Immagini. 2012. p. 68-79.
57. Chang, Y.F. and S.G. Shih, *BIM-based computer-aided architectural design.* Computer-Aided Design and Applications, 2013. **10**(1): p. 97-109.
58. Czmoch, I. and A. Pękala. Traditional design versus BIM based design. in Procedia Engineering. 2014.
59. Li, J., From CAD to the rapid development of BIM, in Applied Mechanics and Materials. 2014. p. 3175-3178.
60. Barbato, D. A methodological approach to BIM design. in 22nd International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG 2014, Communication Papers Proceedings - in co-operation with EUROGRAPHICS Association. 2015.
61. Ghaffarianhoseini, A., et al., Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **75**: p. 1046-1053.
62. Seeber, S.A., Use of infrared thermography for the identification of design and construction faults in buildings. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1984. **446**: p. 56-63.
63. Vavilov, V.P., How accurate is the IR thermographic evaluation of heat losses from buildings? Quantitative InfraRed Thermography Journal, 2010. **7**(2): p. 255-258.
64. González-Aguilera, D., et al., Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades. Energy and Buildings, 2013. **65**: p. 29-36.
65. Previtali, M., et al., Thermographic analysis from uav platforms for energy efficiency retrofit applications. Journal of Mobile Multimedia, 2013. **9**(1-2): p. 66-82.
66. Belussi, L., et al., Energy performance assessment with empirical methods: Application of energy signature. Opto-electronics Review, 2015. **23**(1): p. 83-87.
67. Barreira, E., R.M.S.F. Almeida, and M. Moreira, An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings. Energy and Buildings, 2017. **140**: p. 224-235.
68. Yan-ping, F., W. Yong, and L. Chang-bin, Energy-efficiency supervision systems for energy management in large public buildings: Necessary choice for China. Energy Policy, 2009. **37**(6): p. 2060-2065.

69. Escrivá-Escrivá, G., Basic actions to improve energy efficiency in commercial buildings in operation. Energy and Buildings, 2011. **43**(11): p. 3106-3111.
70. Nord, N. and S.F. Sjøthun, Success factors of energy efficiency measures in buildings in Norway. Energy and Buildings, 2014. **76**: p. 476-487.
71. Mokhtar Azizi, N.S., S. Wilkinson, and E. Fassman, Strategies for improving energy saving behaviour in commercial buildings in Malaysia. Engineering, Construction and Architectural Management, 2015. **22**(1): p. 73-90.
72. Tu, K.J., BEEST-EB energy-rating method for assessing the energy efficiency of existing buildings. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016. **30**(3).
73. Gobierno, P.d., *Real Decreto 1490/1975*, G. España, Editor. 1975.
74. Urbanismo, M.d.O.P.y., Real Decreto 2429/79 (NBE-CT-79), G. España, Editor. 1979.
75. Fomento, M., Real Decreto 314/2006 (CTE), G. España, Editor. 2006.
76. Fomento, M., Real Decreto 47/2007 (Certificación energética), G. España, Editor. 2007.
77. Europeo, P.y.C., *Directiva 2010/31/UE*. 2010.
78. Europeo, P.y.C., *Directiva 2002/91/CE*. 2002.
79. general, N.U.A., A/69/L.85 Seguimiento de los resultados de la Cumbre del Milenio. 2015.
80. Ambiente, P.P.d.l.N.U.p.e.M., Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. 2000.
81. Unidas, N., Protocolo de Kyoto de la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 1998.
82. Change, I.I.P.o.C., Primer Informe de Evaluación del IPCC 1990. 1990.
83. AENOR, UNE-EN 13829:2002 (BDT). 2002.
84. Council, U.S.G.B., *LEED v4*. 2017.
85. Energy, U.S.D.o., ANSI/ASHRAE/IESNA. Standard 90.1-2007 Final. 2007.
86. AENOR, UNE-EN ISO 14025:2010 (Etiquetas y declaraciones ambientales). 2010.
87. AENOR, UNE-EN 15804:2012+A1:2014 (Sostenibilidad en la construcción). 2014.
88. USGBC. *U.S. Green Building Council*. [cited 2017 2017/5/8]; Available from: http://www.usgbc.org/.
89. Europeo, P.y.C., Informe (UE) COM(2013) 483. 2013.
90. Fomento, M., *Real Decreto 235/2013*, G. España, Editor. 2013.
91. Fomento, M., Orden FOM/1635/2013 (CTE-DB-HE), G. España, Editor. 2013.
92. Hacienda, M.d.E.y., Real Decreto Legislativo 3/2011 (Ley de contratos del Estado), G. España, Editor. 2011.
93. Hestnes, A.G., Building Integration Of Solar Energy Systems. Solar Energy, 1999. **67**(4-6): p. 181-187.
94. Aaditya, G. and M. Mani, Climate-responsive integrability Of building-integrated photovoltaics. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2013. **8**(4): p. 271-281.
95. Hachem, C., A. Athienitis, and P. Fazio, Energy performance enhancement in multistory residential buildings. Applied Energy, 2014. **116**: p. 9-19.
96. Mandalaki, M., S. Papantoniou, and T. Tsoutsos, Assessment of energy production from photovoltaic modules integrated in typical shading devices. Sustainable Cities and Society, 2014. **10**: p. 222-231.
97. Ciriminna, R., et al., Guidelines for Integrating Solar Energy in Sicily's Buildings. Green, 2015. **5**(1-6): p. 73-82.
98. Fomento, M., Real Decreto 314/2006 (CTE-DB-SE), G. España, Editor. 2006.
99. Droulia, F., et al., Ground temperature estimations using simplified analytical and semi-empirical approaches. Solar Energy, 2009. **83**(2): p. 211-219.
100. Buzăianu, A., et al., Recent advances of the basic concepts in geothermal turbines of low and high enthalpy. Adv. Mater. Res., 2015. **1114**: p. 233-238.
101. Carmo, C., et al. Empirical platform data analysis to investigate how heat pumps operate in real-life conditions. in Refrigeration Science and Technology. 2015.

102. Graf, S., et al., Prediction of SCP and COP for adsorption heat pumps and chillers by combining the large-temperature-jump method and dynamic modeling. Applied Thermal Engineering, 2016. **98**: p. 900-909.
103. Florides, G. and S. Kalogirou, Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications. Renewable Energy, 2007. **32**(15): p. 2461-2478.
104. Kavanaugh, S. and K. Rafferty, Ground source heat pumps-design of geothermal systems for commercial and institutional buildings. ASHRAE Transactions, 1997. **104**.
105. Li, C., et al., Analysis of geo-temperature restoration performance under intermittent operation of borehole heat exchanger fields. Sustainability (Switzerland), 2016. **8**(1): p. 1-14.
106. Fujii, H., et al., Numerical simulation and sensitivity study of double-layer Slinky-coil horizontal ground heat exchangers. Geothermics, 2013. **47**: p. 61-68.
107. Taylor, S.A. and G.L. Ashcroft, Physical edaphology: The physics of irrigated and nonirrigated soils. 1st ed. San Francisco: W.H. Freeman and Co., 1972.
108. Hillel, D., *Introduction to Environmental Soil Physics.* Elsevier Academic Press, Oxford. Holmes, J.W. and Watson, C.L. (1967) The water budget of irrigated pasture land near Murray Bridge, South Australia. Agricultural Meteorology, 2004. **4**: p. 177-188.
109. Ciriello, V., et al., Temperature fields induced by geothermal devices. Energy, 2015. **93**: p. 1896-1903.
110. Gehlin, S., *Thermal response test method development and evaluation.* Thermal Response Test - Method Development and Evaluation, 2002.
111. Fujii, H., et al., An improved thermal response test for U-tube ground heat exchanger based on optical fiber thermometers. Geothermics, 2009. **38**(4): p. 399-406.
112. Sanner, B., G. Hellström, and J. Spitler, *Thermal response test-current status and world-wide application.* Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 April 2005, 2011.
113. Penrod, E.B., W.W. Walton, and D.V. Terrell, *A method to describe soil temperature variation.* J. Soil Mechanics & Found. Div., ASCE, 1958. **1537**: p. 1-21.
114. Penrod, E.B., J.M. Elliott, and W.K. Brown, Soil temperature variation (1952–1956) at lexington, kentucky. Soil Science, 1960. **90**(5): p. 275-283.
115. Carson, J.E., Analysis of soil and air temperatures by Fourier techniques. Journal of Geophysical Research, 1963. **68**(8): p. 2217-2232.
116. Kusuda, T. and P. Achenbach, Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States. ASHRAE Biannual Meeting, 1965.
117. Sepashka, A.R. and L. Boersma, Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content. Soil Sci. Soc. Am. J, 1979. **43**: p. 434-444.
118. Yuan, Y.P., et al., Semi-analytical solution for steady-periodic heat transfer of attached underground engineering envelope. Building and Environment, 2008. **43**(6): p. 1147-1152.
119. Carslaw, H.S. and J.C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids, Oxford at the Clarendon Press.* Conduction of Heat in Solids. Oxford at the Clarendon Press, 2016.
120. HUELVA, E.U.D., DISPOSITIVO PARA CAPTAR LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE UN OBJETO. 22-02-2011.
121. Martínez, M., J. Andújar, and J. Enrique, Temperature Measurement in PV Facilities on a Per-Panel Scale. Sensors, 2014. **14**(8): p. 13308.
122. Bohórquez, M.A.M., J.M. Enrique Gómez, and J.M. Andújar Márquez, A new and inexpensive temperature-measuring system: Application to photovoltaic solar facilities. Solar Energy, 2009. **83**(6): p. 883-890.
123. Andujar Marquez, J. and T. Mateo Sanguino, *Design of virtual and/or remote laboratories. A practical case.* Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 2010. **7**(1): p. 64-+.
124. Hillel, D., *Introduction to soil physics*. Vol. 364. 1982: Academic press New York.
125. *European Union, Energy in Figures – Pocketbook 2013*. 2013; Available from: http://dx.doi.org/10.2832/19314.
126. Directive, E., 91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Communities, 2002. **4**(2003): p. L1.

127. European Commission, Action Plan for Energy Efficiency: Realising thePotential. COM(2006) 545 Final., 2006. 2006.
128. Evangelisti, L., et al., Influence of the thermal inertia in the European simplified procedures for the assessment of buildings' energy performance. Sustainability, 2014. **6**(7): p. 4514-4524.
129. European Commission, HORIZON 2020 Work Programme 2014–2015. 10Secure, Clean and Efficient Energy (European Commission Decision C (2013)8631 of 10 December 2013),. 2014 [cited 2017; Available from: http://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/main/h2020-wp1415-energy_en.pdf.
130. European Commission, Action Plan for Energy Efficiency: Realising thePotential. COM(2006) 545 Final., 2006. 2007; Available from: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0545:FIN:EN:PDF.
131. Pan, Z., et al., Sensing Properties of a Novel Temperature Sensor Based on Field Assisted Thermal Emission. Sensors, 2017. **17**(3): p. 473.
132. Liu, Y. and J. Zhang, Model Study of the Influence of Ambient Temperature and Installation Types on Surface Temperature Measurement by Using a Fiber Bragg Grating Sensor. Sensors, 2016. **16**(7): p. 975.
133. Chen, C.-C., C.-L. Chen, and Y. Lin, All-Digital Time-Domain CMOS Smart Temperature Sensor with On-Chip Linearity Enhancement. Sensors, 2016. **16**(2): p. 176.
134. Akella Kamakshi, D., A. Shrivastava, and B.H. Calhoun, A 0.2 V, 23 nW CMOS Temperature Sensor for Ultra-Low-Power IoT Applications. Journal of Low Power Electronics and Applications, 2016. **6**(2): p. 10.
135. Ascorbe, J., et al., Humidity Sensor Based on Bragg Gratings Developed on the End Facet of an Optical Fiber by Sputtering of One Single Material. Sensors, 2017. **17**(5): p. 991.
136. Zhang, Y., et al., A Cost-Effective Relative Humidity Sensor Based on Side Coupling Induction Technology. Sensors, 2017. **17**(5): p. 944.
137. Martínez, M.A., J.M. Andújar, and J.M. Enrique, A new and inexpensive pyranometer for the visible spectral range. Sensors, 2009. **9**(6): p. 4615-4634.
138. Mestre, G., et al., An intelligent weather station. Sensors, 2015. **15**(12): p. 31005-31022.
139. Shin, M.-S., et al., Determination of Equivalent Thermal Conductivity of Window Spacers in Consideration of Condensation Prevention and Energy Saving Performance. Energies, 2017. **10**(5): p. 717.
140. Oh, J.H., H.J. Yoo, and S.S. Kim, Evaluation of Strategies to Improve the Thermal Performance of Steel Frames in Curtain Wall Systems. Energies, 2016. **9**(12): p. 1055.
141. Niaz, M.T., F. Imdad, and H.S. Kim, Power Consumption Efficiency Evaluation of Multi-User Full-Duplex Visible Light Communication Systems for Smart Home Technologies. Energies, 2017. **10**(2): p. 254.
142. Sørensen, L.S., Energy Renovation of Buildings Utilizing the U-value Meter, a New Heat Loss Measuring Device. Sustainability, 2010. **2**(2): p. 461-474.
143. Rasooli, A., L. Itard, and C.I. Ferreira, A response factor-based method for the rapid in-situ determination of wall's thermal resistance in existing buildings. Energy and Buildings, 2016. **119**: p. 51-61.
144. ISO, Building Components and Building Elements. Thermal Resistance and Thermal Transmittance. Calculation Method. ISO Standard 6946, InternationalOrganization for Standardization, Geneva, 2007. 2007; Available from: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6946:ed-2:v1:en.
145. Ficco, G., et al., U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings. Energy and Buildings, 2015. **104**: p. 108-121.
146. Ballarini, I., S.P. Corgnati, and V. Corrado, Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. Energy Policy, 2014. **68**: p. 273-284.
147. Building materials and products - Hygrothermal properties -Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values (ISO 10456:2007). 2007.
148. Gaspar, K., M. Casals, and M. Gangolells, A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value. Energy and Buildings, 2016. **130**: p. 592-599.

149. Deconinck, A.-H. and S. Roels, Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements. Energy and Buildings, 2016. **130**: p. 309-320.
150. Lucchi, E., Thermal transmittance of historical brick masonries: A comparison among standard data, analytical calculation procedures, and in situ heat flow meter measurements. Energy and Buildings, 2017. **134**: p. 171-184.
151. ISO, Thermal Insulation. Building Elements. In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance. Part 1: Heat Flow Meter Method. ISO Standard 9869-1, International Organization for Standardization, Geneva. 2014; Available from: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=59697.
152. Evangelisti, L., et al., In situ thermal transmittance measurements for investigating differences between wall models and actual building performance. Sustainability, 2015. **7**(8): p. 10388-10398.
153. Albatici, R., et al., Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer. Energy and buildings, 2013. **66**: p. 33-40.
154. Ohlsson, K. and T. Olofsson, Quantitative infrared thermography imaging of the density of heat flow rate through a building element surface. Applied Energy, 2014. **134**: p. 499-505.
155. Albatici, R., A.M. Tonelli, and M. Chiogna, A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance. Applied Energy, 2015. **141**: p. 218-228.
156. Bohórquez, M.A.M., J.M.E. Gómez, and J.M.A. Márquez, A new and inexpensive temperature-measuring system: Application to photovoltaic solar facilities. Solar energy, 2009. **83**(6): p. 883-890.
157. Martínez, M.A., J.M. Andújar, and J.M. Enrique, Temperature measurement in pv facilities on a per-panel scale. Sensors, 2014. **14**(8): p. 13308-13323.
158. Salamone, F., et al., An open source low-cost wireless control system for a forced circulation solar plant. Sensors, 2015. **15**(11): p. 27990-28004.
159. Marques, G. and R. Pitarma, An indoor monitoring system for ambient assisted living based on internet of things architecture. International journal of environmental research and public health, 2016. **13**(11): p. 1152.
160. *IEEE 802.15 WPAN Task Group4 (TG4)*. Accessed on 15/05/2017]; Available from: http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html.
161. *ZigBee Alliance*. Accessed on 15/05/2017]; Available from: http://www.zigbee.org/.
162. *Raspberry Pi org*. Accessed on 15/05/2017]; Available from: https://www.raspberrypi.org/.
163. Sparkfun. *Xbee Pro series*. 2009 [cited 12.2.2017; Available from: https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf.
164. Salamone, F., et al., Design and Development of a Nearable Wireless System to Control Indoor Air Quality and Indoor Lighting Quality. Sensors, 2017. **17**(5): p. 1021.
165. Lockridge, G., et al., Development of a Low-Cost Arduino-Based Sonde for Coastal Applications. Sensors, 2016. **16**(4): p. 528.
166. *Arduino UNO*. Accessed on 15/05/2017]; Available from: https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno.
167. Integrated, M., DS 2438, Maxim Smart Battery Monitor.
168. Fan, Y. and X. Xia. A Multi-objective Optimization Model for Building Envelope Retrofit Planning. in Energy Procedia. 2015.
169. Karmellos, M., A. Kiprakis, and G. Mavrotas, A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies. Applied Energy, 2015. **139**: p. 131-150.
170. Wang, B. and X. Xia. Maintenance plan optimization in building retrofitting with interacting energy efficiency effects. in Proceedings - 2015 Chinese Automation Congress, CAC 2015. 2016.
171. Michael, M., L. Zhang, and X. Xia, An optimal model for a building retrofit with LEED standard as reference protocol. Energy and Buildings, 2017. **139**: p. 22-30.
172. Jafari, A. and V. Valentin, An optimization framework for building energy retrofits decision-making. Building and Environment, 2017. **115**: p. 118-129.

173. Sjarifudin, F.U., Adaptive building envelope system using parametric camshaft mechanism for sustainable building, in Applied Mechanics and Materials. 2012. p. 919-924.
174. Kabre, C. and U. Pottgiesser. A review of influences of modern movement architecture on today's Façade design in tropical climate of India. in Proceedings of the 13th Docomomo International Conference Seoul: Expansion and Conflict, Seoul 2014. 2014.
175. Franco, G. and S. Musso. Conservation of modern architecture and the adaptation of new requirements. in Proceedings of the 14th International Docomomo Conference - Adaptive Reuse: The Modern Movement Towards the Future. 2016.
176. Iannaccone, G., M. Imperadori, and G. Masera, Smart-ECO: A Real Vision for Energy Efficient Architecture Towards 2030, in SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. 2014. p. 1-11.
177. Chen, X., H. Yang, and L. Lu, A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **50**: p. 1425-1436.
178. AlFaris, F., A. Juaidi, and F. Manzano-Agugliaro, Improvement of efficiency through an energy management program as a sustainable practice in schools. Journal of Cleaner Production, 2016. **135**: p. 794-805.
179. Kumara, W.H.C.D., K.G.A.S. Waidyasekara, and R.P.N.P. Weerasinghe, Building management system for sustainable built environment in Sri Lanka. Built Environment Project and Asset Management, 2016. **6**(3): p. 302-316.
180. Park, H.S., et al., Development of a new energy benchmark for improving the operational rating system of office buildings using various data-mining techniques. Applied Energy, 2016. **173**: p. 225-237.
181. Dequaire, X., Passivhaus as a low-energy building standard: Contribution to a typology. Energy Efficiency, 2012. **5**(3): p. 377-391.
182. Márquez, J.M.A., M.Á.M. Bohórquez, and S.G. Melgar, Ground thermal diffusivity calculation by direct soil temperature measurement. application to very low enthalpy geothermal energy systems. Sensors (Switzerland), 2016. **16**(3).
183. TEP192, R.G., EREBA2020 Research Project, in Modelo de estrategia a largo plazo para movilizar inversiones en la renovación del parque nacional de edificios residenciales en Andalucía orientado al ahorro de un 20% de energía en el horizonte 2020. 2015.
184. pública, M.d.H.y.F. *www.catastro.meh.es*. 2017 [cited 2017 02/28/2017]; Available from: www.catastro.meh.es.

Contribuciones desde la Arquitectura y la Ingeniería a los edificios de energía mínima TESIS DOCTORAL



Símbolos y abreviaturas

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

	Desarrollo	Explicación
+EB	*Plus Energy Building*	Edificio de balance de energía neta positiva
ACS	Agua Caliente Sanitaria	
ASHRAE	*American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers*	Asociación americana de ingenieros de calefacción, refrigeración y AA
BEEL	*Building Energy Efficiency Labelling*	Etiquetado de Eficiencia Energética de Edificios
BDT	*Blower Door Test*	Test de infiltración de aire
BIM	*Building Information Model*	Modelo de edificio virtual
BREEAM	*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*	Método de evaluación medioambiental para la investigación en edificios
CAD	*Computer Assisted Design*	Diseño asistido por ordenador
CEO	*Chief Executive Officer*	Director ejecutivo
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático	
COP	*Coefficient Of Performance*	Coeficiente de rendimiento de una máquina térmica
Csa	*Warm temperate/summer dry/hot summer*	Temperatura templada/verano seco/verano cálido
CTE	Código Técnico de la Edificación	
CTE-DB-HE	Código Técnico de la Edificación, Documento Básico, Ahorro de Energía	
DGNB	*Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen*	Consejo alemán de construcción sostenible
GBEL	*Green Building Evaluation and Labelling*	Programa de evaluación y etiquetado de edificios verdes
GEI	Gases de efecto invernadero	
GTP	*Ground Temperature Probe*	Sonda de temperatura del terreno
HQE	*Haute Qualité Environnementale*	Alta calidad medioambiental
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning	Calefacción, ventilación y refrigeración
IoT	*Internet of the Things*	Internet de las cosas
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*	Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático
K_G	Coeficiente de transmisión térmica del edificio	
LAR	Laboratorio de Arquitectura Responsable	
LEED	*Leadership in Energy & Environmental Design*	Liderazgo en diseño energético y medioambiental
LM	Lana Mineral	Fibra de vidrio o lana de roca
LOD	*Level Of Development*	Nivel de desarrollo del objeto BIM

	Desarrollo	Explicación
LPO	Licencia de Primera Ocupación	
MD	*Mesurement Device*	Dispositivo de medición
MEB	*Minimun Energy Building*	Edificio de consumo mínimo de energía
MOHURD	*Ministry of Housing and Urban-Rural Development*	Ministerio de vivienda y desarrollo Urbano Rural
NBE-CT-79	Normativa Básica de la Edificación, Condiciones Térmicas, año 1979	
nZEB	*Net Zero Energy Building*.	Edificio de consumo de energía casi nula
ODM	Objetivos de Desarrollo del Milenio	
PC	Presupuesto de Construcción de un edificio	
PEM	Presupuesto de ejecución material de un edificio	
PEP	Plataforma Española Passivhaus	
PERI	Plan Especial de Reforma Interior	
PHI	*Passiv Haus Institute*	instituto Passive House
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente	
PP	Presupuesto de Promoción de un edificio	
PUR	Poliuretano proyectado	
PV	*Photovoltaic energy*	Energía fotovoltaica
PYL	Placa de yeso laminado	
SATE	Sistema de Aislamiento Térmico Exterior	
SC	Superficie Construida de un edificio	
SCADA	*Supervisory Control And Data Acquisition*	Supervisión, Control y Adquisición de Datos
SIG	Sistema de Información Geográfica	
SU	Superficie Útil de un edificio	
Sw	*Addressable electronic switch*	Interruptor electrónico direccionable
TRT	*Thermal Response Test*	Test de respuesta térmica
TS	*Temperature Sensor*	Sensor de temperatura
TYL	Tabique de Yeso Laminado	
U-Value	Transmitancia térmica	

	Desarrollo	Explicación
UE	Unión Europea	
USGBC	U.S. Green Building Council	Consejo de construcción sostenible de EEUU
VI	*Virtual Instrument*	Instrumento virtual
VLEGE	V*ery Low Enthalpy Geothermal Energy*	Sistema de energía geotérmica de muy baja entalpía
VMRC	Ventilación Mecánica con Recuperación de Calor	
XPS	Poliestireno extruido	
ZEB	*Zero Energy Building*	Edificio de consumo nulo de energía