DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

ANÁLISIS MULTICRITERIO DE LA EFICIENCIA DE
MEDIDAS DE REHABILITACIÓN DE VIVIENDAS
MEDIANTE EL ENFOQUE DE CICLO DE VIDA
PROPUESTA METODOLÓGICA

Tesis Doctoral

OLATZ POMBO RODILLA

Arquitecta

Directores:

Fco. Javier Neila González

Doctor Arquitecto

Beatriz Rivela Carballal

Doctora Ingeniera Química

2016

POLITÉCNICA

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

Presidente: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

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

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Índice de contenidos

Resumen	IV
Abstract	IX
Acrónimos	XI
Listado de tablas	XIII
Listado de figuras	XXIII

Capítulo 1. Introducción

1.1. Justificación de la investigación	3
1.2. Hipótesis	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo principal	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. Metodología	7
1.5. Bibliografía	9

Capítulo 2. Estado de la cuestión

2.1. Introducción	13
2.2. Soluciones de rehabilitación y criterios de evaluación en el ámbito residencial	15
2.2.1. Evaluación ambiental	17
2.2.2. Evaluación económica	18
2.2.3. Evaluación multicriterio	20
2.3. El Enfoque de Ciclo de Vida en la rehabilitación de viviendas	24
2.3.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	24
2.3.2. Análisis del Coste de Ciclo de Vida (CCV)	25
2.3.3. Optimización ambiental y económica	26
2.4. La rehabilitación a nivel nacional	30
2.4.1. Iniciativas de rehabilitación de vivienda social	30
2.4.2. Políticas de fomento a la rehabilitación privada	33
2.5. Marco normativo	36
2.5.1. Evolución histórica del marco normativo en España	36
2.5.2. Normativa relativa a la Eficiencia Energética	37
2.5.2.1. Normativa Europea	37

2.5.2.2. Normativa Española	40
2.5.3. Normativa relativa a la sostenibilidad en la edificación	42
2.5.3.1. Evaluación del comportamiento ambiental	42
2.5.3.2. Evaluación del comportamiento económico	43
2.6. Conclusiones	44
2.7. Bibliografía	46

Capítulo 3. Propuesta metodológica de evaluación multicriterio de las soluciones de rehabilitación

3.1. Introducción	61
3.2. Revisión crítica de trabajos de investigación previos	62
3.2.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	62
3.2.2. Coste de Ciclo de Vida (CCV)	64
3.2.3. Optimización ambiental y económica	66
3.2.4. Conclusiones y perspectivas futuras	68
3.3. Planteamiento metodológico para el análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación de viviendas	70
3.3.1. Definición del objetivo y alcance	70
3.3.1.1. Equivalente funcional	71
3.3.1.2. Periodo de estudio de referencia	71
3.3.1.3. Límite del sistema	71
3.3.2. Inventario del ciclo de vida (ICV)	73
3.3.2.1. Cuantificación	73
3.3.2.2. Selección de los datos	73
3.3.3. Evaluación del comportamiento energético	74
3.3.3.1. Evaluación del comportamiento energético durante la vida útil	74
3.3.3.2. Evaluación del comportamiento energético del ciclo de vida	77
3.3.4. Evaluación del comportamiento ambiental	78
3.3.4.1. Evaluación de impacto ambiental de ciclo de vida (EIACV)	79
3.3.4.2. Interpretación de resultados	96
3.3.5. Evaluación del comportamiento económico	97
3.3.5.1. Cálculo de costes e ingresos	97
3.3.6. Optimización multicriterio	101
3.3.7. Análisis de sensibilidad	104
3.4. Conclusiones	105
3.5. Bibliografía	106

Capítulo 4. Definición de los casos de estudio

4.1. Introducción	121
4.2. Definición del modelo edificatorio	123
4.2.1. Selección de ciudades	126
4.2.2. Estudio tipológico de parque residencial de los años 60	127
4.2.2.1. Tipologías residenciales	130
4.2.2.2. Caracterización del bloque en "H" de los años 60	135
4.2.2.3. Estudio comparativo de los edificios seleccionados	136
4.2.3. Modelo edificatorio de referencia	147
4.3. Escenarios de rehabilitación	150
4.4. Conclusiones	152
4.5. Bibliografía	154

Capítulo 5. Análisis multicriterio de las estrategias de rehabilitación de viviendas: casos de estudio

5.1. Introducción	159
5.2. Aspectos metodológicos de común aplicación los casos de estudio	160
5.2.1. Condiciones climáticas	160
5.2.2. Descripción de las soluciones de rehabilitación a evaluar	160
5.2.2.1. Escenario E0: Edificio sin rehabilitar	160
5.2.2.2. Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación	161
5.2.2.3. Escenario E2A: CTE DB-HE (rehabilitación)	161
5.2.2.4. Escenario E2B: CTE DB-HE (nueva edificación)	162
5.2.2.5. Escenario E3: Estándar Passivhaus	163
5.2.3. Análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación	163
5.2.3.1. Definición del objetivo y alcance	163
5.2.3.2. Inventario del ciclo de vida	165
5.2.3.3. Evaluación del comportamiento energético	167
5.2.3.4. Evaluación del comportamiento ambiental	169
5.2.3.5. Evaluación del comportamiento económico	170
5.2.3.6. Optimización multicriterio	172
5.3. Caso de estudio: Madrid	174
5.3.1. Condiciones climáticas	174
5.3.2. Descripción de las soluciones de rehabilitación a evaluar	176
5.3.2.1. Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación	176
5.3.2.2. Escenario E2A: CTE DB-HE (rehabilitación)	181
5.3.2.3. Escenario E2B: CTE DB-HE (nueva edificación)	183
5.3.2.4. Escenario E3: Estándar Passivhaus	184
5.3.3. Análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación	187
5.3.3.1. Definición del objetivo y alcance	187
5.3.3.2. Inventario del ciclo de vida	187

5.3.3.3. Evaluación del comportamiento energético	192
5.3.3.4. Evaluación del comportamiento ambiental	195
5.3.3.5. Evaluación del comportamiento económico	199
5.3.3.6. Optimización multicriterio	200
5.3.4. Conclusiones del caso de estudio de Madrid	203
5.4. Caso de estudio: Bilbao	204
5.4.1. Condiciones climáticas	204
5.4.2. Definición de los escenarios de rehabilitación	206
5.4.2.1. Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación	206
5.4.2.2. Escenario E2A: CTE DB-HE (rehabilitación)	211
5.4.2.3. Escenario E2B: CTE DB-HE (nueva edificación)	213
5.4.2.4. Escenario E3: Estándar Passivhaus	215
5.4.3. Análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación	218
5.4.3.1. Definición del objetivo y alcance	218
5.4.3.2. Inventario del ciclo de vida	218
5.4.3.3. Evaluación del comportamiento energético	221
5.4.3.4. Evaluación del comportamiento ambiental	223
5.4.3.5. Evaluación del comportamiento económico	226
5.4.3.6. Optimización multicriterio	226
5.4.4. Conclusiones del caso de estudio de Bilbao	230
5.5. Caso de estudio: Sevilla	231
5.5.1. Condiciones climáticas	231
5.5.2. Definición de los escenarios de rehabilitación	233
5.5.2.1. Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación	233
5.5.2.2. Escenario E2A: CTE DB-HE (rehabilitación)	235
5.5.2.3. Escenario E2B: CTE DB-HE (nueva edificación)	237
5.5.2.4. Escenario E3: Estándar Passivhaus	242
5.5.3. Análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación	245
5.5.3.1. Definición del objetivo y alcance	245
5.5.3.2. Inventario del ciclo de vida	246
5.5.3.3. Evaluación del comportamiento energético	248
5.5.3.4. Evaluación del comportamiento ambiental	250
5.5.3.5. Evaluación del comportamiento económico	253
5.5.3.6. Optimización multicriterio	253
5.5.4. Conclusiones del caso de estudio de Sevilla	257
5.6. Comparación de los casos de estudio	258
5.6.1. Resultados energéticos	258
5.6.2. Optimización multicriterio	260
5.6.2.1. Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación	260
5.6.2.2. Escenario E2A: CTE DB-HE (rehabilitación)	261
5.6.2.3. Escenario E2B: CTE DB-HE (nueva edificación)	262
5.6.2.4. Escenario E3: Estándar Passivhaus	262
5.6.3. Conclusiones de la comparación de los casos de estudio	264
5.7. Conclusiones	265
5.8. Bibliografía	268

Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas de investigación

6.1. Conclusiones de la revisión crítica de las metodologías de evaluación	275
6.2. Conclusiones de la metodología propuesta para evaluar de las soluciones de rehabilitación	277
6.3. Conclusiones de la rehabilitación actual	279
6.4. Conclusiones de los casos de estudio	280
6.5. Conclusiones generales	285
6.6. Futuras líneas de investigación	287
6.7. Difusión de resultados	290
6.7.1. Publicaciones en revistas	290
6.7.2. Publicaciones en congresos y seminarios	290

English summary

Chapter 1: Introduction

1.1. Background	295
1.2. Hypothesis	297
1.3. Objectives	297
1.3.1. Main objective	297
1.3.2. Specific objectives	297
1.4. Research methodology	298

Chapter 6: Conclusions and future Outlook

6.1. Conclusions of the critical review of the evaluation methods	300
6.2. Conclusions of the methodology proposed for the assessment of retrofitting solutions	302
6.3. Conclusions of the current housing renovation	304
6.4. Conclusions of the retrofitting scenarios	305
6.5. General conclusions	310
6.6. Further research	311
6.7. Dissemination of results	313
6.7.1. Journals	313
6.7.2. International conferences and seminars	313
References	315

Bibliografía	317
---------------------	------------

Glosario de términos	345
Anexos	
Anexo A. Fichas barrios años 60: Madrid	353
Anexo B. Fichas individuales edificios	377
Anexo C. Soluciones actuales de rehabilitación	419
C.1. Caso de estudio: Madrid	421
C.2. Caso de estudio: Bizkaia	428
C.3. Caso de estudio: Sevilla	432
Anexo D. Cálculo de transmitancias térmicas	435
D.1. Caso de estudio: Madrid	437
D.2. Caso de estudio: Bilbao	443
D.3. Caso de estudio: Sevilla	449
Anexo E. Inventario de Ciclo de Vida	453
E.1. Caso de estudio: Madrid	455
E.2. Caso de estudio: Bilbao	463
E.3. Caso de estudio: Sevilla	473
Anexo F	487
F.1. Resultados de consumo de energía primaria total (CED)	489
F.2. Resultado de los impactos ambientales. Caso de estudio: Madrid	490
F.3. Resultado de los impactos ambientales. Caso de estudio: Bilbao	495
F.3. Resultado de los impactos ambientales. Caso de estudio: Sevilla	500
Anexo G. Resultados de la evaluación económica	505
G.1. Caso de estudio: Madrid	507
G.2. Caso de estudio: Bilbao	508
G.3. Caso de estudio: Sevilla	509

Resumen

Las investigaciones llevadas a cabo para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de los edificios han proliferado notablemente en los últimos años. Asimismo, las administraciones públicas han realizado esfuerzos significativos con el fin de promover la mejora del parque edificatorio existente, con el fin de cumplir con los compromisos europeos para el “Horizonte 2020”. Las actuaciones de rehabilitación residencial, han sido evaluadas únicamente en términos de ahorro energético y de emisiones de CO₂, durante la fase de uso del edificio. Algunas investigaciones revelan que a medida que se reduce el consumo energético durante la etapa de uso, el resto de etapas del ciclo de vida de la edificación adquieren mayor importancia, llegando a ser comparables entre sí. Por ello, considerar el ciclo de vida completo del edificio es fundamental para evaluar el potencial real de mejora de comportamiento del parque residencial existente. Dado que en España esta visión integral no está siendo contemplada, se cuestiona si las medidas de rehabilitación energética que se están aplicando actualmente en el contexto edificatorio español son adecuadas, si se incorpora el punto de vista ambiental y económico, desde la perspectiva de Ciclo de Vida.

En este contexto, se ha planteado la presente investigación, cuyo objetivo principal ha sido el desarrollo de una metodología multicriterio para el análisis comparativo de la eficiencia de las estrategias actuales de rehabilitación, combinando la evaluación del comportamiento energético, ambiental y económico mediante el Enfoque de Ciclo de Vida. Esta propuesta metodológica parte de una revisión crítica de las metodologías de evaluación existentes a nivel internacional, identificando las hipótesis de partida ya consensuadas y asentadas en la comunidad científica, detectando, asimismo, las carencias existentes. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y Coste de Ciclo de Vida (CCV) se han combinado mediante el método de optimización de Pareto, permitiendo determinar las estrategias más adecuadas en cada caso. Los impactos ambientales se han expresado en valores monetarios, obteniendo una métrica única que facilitase la combinación de los resultados ambientales y económicos.

Con el fin de ilustrar la metodología desarrollada, se ha definido un modelo de edificio, que se enmarca en un periodo de construcción representativo, la década de los 60, y que es común a tres localidades con gran construcción de vivienda en esta época y con climas diferenciados: Madrid, Bilbao y Sevilla. Adicionalmente, se plantean cuatro escenarios de rehabilitación, evaluando no sólo las estrategias actuales de rehabilitación (escenario E1), sino también escenarios cada vez más exigentes en términos de demanda energética: desde el cumplimiento del CTE para rehabilitación y nueva

edificación (escenarios E2A y E2B, respectivamente) hasta el cumplimiento del estándar Passivhaus (escenario E3).

Las estrategias de rehabilitación se centran en actuaciones de mejora de la envolvente. En base a las soluciones más representativas de cada localidad, se han fijado las medidas de rehabilitación para los escenarios definidos, atendiendo a las exigencias de demanda energética de cada escenario en cada ciudad. La aplicación de la metodología ha posibilitado ajustar la propia metodología y definir los criterios de optimización, a partir de los cuales se ha procedido al análisis multicriterio de las estrategias de rehabilitación, permitiendo la identificación de las soluciones más adecuadas en cada caso de estudio, desde el punto de vista ambiental y económico, considerando el ciclo de vida completo del edificio. Los resultados obtenidos han contribuido al debate sobre la pertinencia de las prácticas de rehabilitación actuales y las políticas de rehabilitación que han sido objeto de estudio en las ciudades de Madrid, Bilbao y Sevilla.

Los casos de estudio analizados en la presente investigación han mostrado que, para el tipo de edificio analizado, las estrategias actuales de rehabilitación son cuestionables desde el punto de vista ambiental y económico. Asimismo, el cumplimiento del Código Técnico para nueva edificación, en este caso de estudio, es el único escenario que es recomendable para las tres ciudades. En Madrid y Bilbao, la inversión adicional con respecto a un escenario menos exigente (p. ej. E2A) es baja (9% y 11% respectivamente), en comparación con los ahorros ambientales (24% y 56% respectivamente) y económicos (42% y 150% respectivamente) extra que se pueden conseguir. Por lo que se puede concluir, que las estrategias actuales de rehabilitación son cuestionables si se incorpora la perspectiva ambiental y económica de Ciclo de Vida.

Abstract

The amount of research carried out in building renovation has significantly increased over recent years. Following the European commitment of "Horizon 2020", public administrations have made significant efforts towards energy efficiency improvement in existing buildings. The problem is that housing renovation is assessed only in terms of annual energy savings and reduction of CO₂ emissions. However, some authors conclude from their research that after retrofitting a building, the energy use decreases, but this is accompanied by an increase in use of materials, which increases the demands on production energy. Therefore, the embodied energy of building materials increases and the energy use in the operation phase is comparable to those of other phases. This highlights the need to apply a Life Cycle Approach in order to find the optimal retrofitting solutions, and to identify the real improvement potential of housing renovation. Since this is not being considered in Spain, it may be challenged whether the current energy saving measures that are being applied in the Spanish building context, are suitable if the environmental and economic Life Cycle Approach is considered.

Therefore, the main objective of the research has been the development of a multi-criteria methodology for the comparative assessment of the efficiency of the current retrofitting strategies, combining energy, environmental and economic evaluation, from the Life Cycle Approach. A critical review of the methods and tools that are currently used to evaluate housing building retrofits, enable to identify the assumptions accepted by the scientific community, in order to be integrated in the methodology. Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost (LCC) are combined by expressing environmental impacts in monetary values. A Pareto optimization is used to select the preferred strategies.

The methodology is illustrated by three case studies in order to provide an in-depth understanding of the approach followed. To do so, a representative building model is defined according to a representative construction period, the 1960s, that is common to the three cities selected, which have a large stock built in this period and different climates: Madrid, Bilbao and Seville. Moreover, four retrofitting scenarios are proposed, evaluating not only the current energy saving measures (scenario E1), but also scenarios with increasingly demanding requirements in terms of energy demand, from the achievement of the Spanish Building Regulation (CTE) for both existing and new buildings (scenarios E2A and E2B, respectively), up to the Passivhaus standard (scenario E3).

Energy-efficient renovation strategies are focused on the improvement of the building envelope. Thus, on the basis of the most representative solutions in each city, retrofitting measures for each scenario are proposed, adapting them to the energy demand requirements of each scenario in each city. The application of the methodology in the case studies has helped to adjust the methodology itself, and to define the optimization objectives. Thereafter, the multi-criteria assessment of the defined energy saving measures is conducted, identifying the most suitable solutions in each case study. On the other hand, results have contributed to the debate on the adequacy of the current renovation practices and policies that have been analyzed in Madrid, Bilbao and Seville.

The cases studies assessed within this research show how current renovation strategies seem unsuitable from the environmental and economic approach. Furthermore, the achievement of the Spanish Building Code (CTE) for new buildings, in this case study, is the only scenario that seems adequate for the three cities. In Madrid and Bilbao, the additional investment needed compared to a lower insulation level of the building envelope (i.e. scenario E2B compared to scenario E2A) is not so high (9% and 11% respectively) while it leads to important extra environmental (24% and 56% respectively) and financial (42% and 150% respectively) savings. These findings indicate that the current retrofitting solutions applied in the Spanish building context are questionable, if the environmental and economic life cycle approach is included.

Acrónimos

ACV: Análisis de Ciclo de Vida / **LCA:** *Life Cycle Assessment*

ASCV: Análisis Social de Ciclo de Vida / **SLCA:** *Social Life Cycle Assessment* /

ADP-fossil: *Abiotic resource Depletion Potential for elements* / Potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos

APD-non fossil: *Abiotic resource Depletion Potential of fossil fuels*/ Potencial de agotamiento de recursos de combustibles fósiles

AP: *Acidification Potential of land and wáter* / Potencial de acidificación de tierra y agua

AVRA: Agencia de Vivienda y Rehabilitación de Andalucía

BBCA: Base de Costes de la Construcción de Andalucía

CD: Costes de Daño

CED: *Cumulative Energy Demad*

CEN: Comité Europeo de Normalización

CP: Costes de Prevención

CTE: Código Técnico de la Edificación

CCV: Coste de Ciclo de Vida / **LCC:** *Life Cycle Cost*

DAP: Declaración Ambiental de Producto / **EPD:** *Environmental Product Declaration*

DB-HE: Documento Básico de ahorro de Energía

DB-HS: Documento Básico de Salubridad

DEAP: *Dwelling Energy Assessment Procedure*

EMVS: Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo

EN: *European Norm* / Norma Europea

EP: *Eutrophication Potential* / Potencial de eutrofización

EPS: Poliestireno expandido

EVE: Ente Vasco de la Energía

FCD: Flujo de Caja Descontado

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GWP: *Global Warming Potential* / Potencial de calentamiento global

HC: Huella de Carbono

HVAC: instalaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado

IDAE: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

IE: *Initial Environmental cost* / Coste ambiental inicial

IF: *Initial Finantial cost* / Coste económico inicial

INE: Instituto Nacional de Estadística

IPC: Índice de Precios de Consumo

IPPC: *The Intergovernmental Panel on Climate Change* / Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

ISO: International Standard Organization / Organización Internacional de Normalización

ITE: Inspección Técnica de los Edificios

LE: *Life cycle Environmental cost* / Coste ambientales de ciclo de vida

LOE: Ley de Ordenación de la Edificación

LF: *Life cycle Financial cost* / Coste económicos de ciclo de vida

MW: *Mineral Wool* / lana mineral

NBE: Normas Básicas de la Edificación

ODP: *Depletion potential of the stratospheric ozone layer* / Potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférica

ONU: Naciones Unidas

PAEE: Plan de Ahorro y Eficiencia Energética

PAREER: Programa de ayudas a proyectos integrales de ahorro y eficiencia energética en edificios de viviendas del IDAE

PIB: Producto Interior Bruto

POCP: *Formation potential of tropospheric ozone photochemical oxidants* / Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos del ozono troposférico

PV: Paneles fotovoltaicos

RC: recuperación de calor

RCD: Residuos de Construcción y Demolición

RPT: Rotura de puente térmico

RSP: *Reference Study Period* / Periodo de estudio de referencia SC:

SATE: Sistema de Aislamiento Térmico por el exterior / **ETICS:** *External Thermal Insulation System*

SETAC: Society of Environmental Toxicology and Chemistry / Sociedad de Química y Toxicología Ambiental

SIR: *Savings-to-Investment Ratio* / Ratio ahorro-inversión

TIR: Tasa Interna de Retorno;

UE: Unión Europea

UNE: Una Norma Española

U: transmitancia térmica

VAN: Valor Actual Neto;

VM: Ventilación mecánica.

WTP: *Willingness to pay* / Disposición a pagar

XPS: Poliestireno extruido

Listado de tablas

Capítulo 2

Tabla 2.1. Resumen de las investigaciones de rehabilitación de viviendas seleccionadas, clasificadas según el tipo de vivienda, los criterios de evaluación y las estrategias de eficiencia energética. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Tabla 2.2. Resumen de los trabajos de investigación seleccionados que evalúan con criterios ambientales las medidas de eficiencia energética aplicadas en rehabilitación de viviendas. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Tabla 2.3. Resumen de los trabajos de investigación seleccionados que evalúan con criterios económicos las medidas de eficiencia energética aplicadas en rehabilitación de viviendas. Adaptado de Pombo et al. (2016).

Tabla 2.4. Resumen de los trabajos de investigación de las metodologías para la evaluación multicriterio de las estrategias de rehabilitación en edificios residenciales. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Capítulo 3

Tabla 3.1. Información considerada en el ACV de la rehabilitación de viviendas. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Tabla 3.2. Información considerada en el CCV de la rehabilitación de edificios residenciales. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.3. Optimización ambiental y económica de las estrategias de eficiencia energética en edificios residenciales. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.4. Perfiles de uso normalizado para edificios residenciales. Fuente: CTE DB-HE1, Apéndice C.

Tabla 3.5. Caudal de infiltraciones (m^3/h) para un salto de presiones de 4 Pa. Fuente: adaptado del Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3 (2012, p. 75).

Tabla 3.6. Valor de n_{50} (ren/h) para los diferentes niveles de estanquidad. Fuente: anexo F del estándar prEN ISO 13790:1999.

Tabla 3.7. Resumen de los valores monetarios de Europa Occidental (central, inferior y superior) para los indicadores CEN. adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.8. Resumen de los métodos existentes por categoría de impacto y los métodos utilizados para las estimaciones centrales, inferiores y superiores. Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.9. Planteamiento de la incertidumbre en MMG2014. Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.10. Descripción de los valores de incertidumbre para los indicadores CEN. Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.11. Costes de agotamiento de los recursos para diferentes sustancias, basado en la relación con los precios de mercado. Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.12. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de agotamiento de recursos abióticos para elementos (ADP_non fossil). Fuente: Adaptado de MMG2014 (De Nocker y Debacker, 2015)

Tabla 3.13. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de agotamiento de recursos abióticos para combustibles fósiles (ADP_fossil). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.14. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de acidificación de tierra y agua (AP). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.15. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de eutrofización (EP). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.16. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de calentamiento global (GWP). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.17. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférica (ODP). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.18. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos del ozono troposférico (POCP). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.19. Resumen de los valores monetarios de Europa Occidental (central, inferior y superior) para los indicadores CEN y el método de cálculo. Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Tabla 3.20. Datos de entrada de los costes y la tasa de incremento real para el CCV.

Capítulo 4

Tabla 4.1. Políticas de la vivienda en España. Fuente: elaboración propia a partir de Moza González (1983) y Blos (1999).

Tabla 4.2. Barrios de promoción pública en Madrid (1957-1970). Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.3. Barrios de promoción privada en Madrid (1957-1970). Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.4. Indicadores analizados para definir el modelo. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.5. Superficies útiles de las viviendas analizadas Fuente: elaboración propia.

Capítulo 5

Tabla 5.1. Caracterización de la envolvente del edificio sin rehabilitar. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.2. Ratio de superficie de elemento de la envolvente por 1 m² de superficie útil de vivienda. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.3. Escenario de fin de vida considerado. Fuente: elaboración propia a partir de la información proporcionada por: (1) la Planta de Gestión de Residuos Volbas, S. L., (2) las DAP proporcionadas por Saint-Gobain (2012), (3) la Planta de Gestión de RCD Salmedina, Madrid.

Tabla 5.4. Resumen de los valores monetarios de Europa Occidental (central, inferior y superior) para los indicadores CEN. Fuente: MMG2014 (De Nocker y Debacker, 2015, p. 12).

Tabla 5.5. Parámetros de entrada de costes y tasas de crecimiento real para el CCV. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016)

Tabla 5.6. Porcentaje de subvención y cuantía máxima según el grado de reducción de la transmitancia térmica de la envolvente en Madrid. Fuente: EMVS.

Tabla 5.7. Resumen de las soluciones de rehabilitación adoptadas en los edificios estudiados en Madrid. Fuente: elaboración propia a partir del análisis de los expedientes de concesión de las ayudas de la EMVS en el periodo 2010-2012.

Tabla 5.8. Soluciones adoptadas en el Escenario E1 en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.9. Soluciones adoptadas en el Escenario E2A en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.10. Soluciones adoptadas en el Escenario E2B en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.11. Soluciones adoptadas en el Escenario E3 en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.12. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.13. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2A por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.14. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.15. Ratio de los elementos de ventilación mecánica con recuperador de calor por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.16. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E3 por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.17. Superficie total de calefacción en edificios con sólo varias viviendas familiares, construidas entre 1961 y 1970, según el tipo de combustible, para la localidad de Madrid. Fuente: elaboración propia a partir del documento de Escala de calificación energética para edificios existentes (IDAE, 2011).

Tabla 5.18. Resultados de demanda, consumo de energía final y ahorro de calefacción en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.19. Resultados de demanda, consumo de energía final y ahorro de refrigeración en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.20. Número de viviendas según tipo de solución de rehabilitación y espesor de aislamiento. Fuente: elaboración propia a partir de los expedientes de concesión de las ayudas en Bizkaia del Gobierno Vasco.

Tabla 5.21. Soluciones adoptadas en el Escenario E1 en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.22. Soluciones adoptadas en el Escenario E2A en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.23. Soluciones de rehabilitación de acuerdo a los valores U orientativos y la solución adoptada para conseguir la demanda límite del escenario E2B en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.24. Soluciones adoptadas en el escenario E3 en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.25. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 por m² de vivienda en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.26. Número total de viviendas en edificios con sólo varias viviendas familiares, construidas entre 1961 y 1970, según tipo de combustible, para la localidad de Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir del Censo de Población y Viviendas 2011 (Instituto Nacional de Estadística, 2015).

Tabla 5.27. Resultados energéticos anuales (calefacción) de los escenarios planteados en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.28. Soluciones adoptadas en el Escenario E1 en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.29. Soluciones adoptadas en el Escenario E2A en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.30. Soluciones adoptadas en el Escenario E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.31. Soluciones adoptadas en el Escenario E3 en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.32. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 por m² de vivienda en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.33. Resultados energéticos anuales (calefacción) de los escenarios planteados en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.34. Resultados energéticos anuales (refrigeración) de los escenarios planteados en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 6

Tabla 6.1. Resumen del nivel de adecuación de las estrategias adoptadas en los escenarios de rehabilitación propuestos, en Madrid, Bilbao y Sevilla.

English summary

Chapter 6

Table 6.1. Summary of the adequacy level of the retrofitting solutions assessed in the renovation scenarios proposed, in Madrid, Bilbao and Seville.

Anexos

Anexo C

Tabla C.1. Resumen de los expedientes de rehabilitación de concesión de las ayudas a la rehabilitación 2010-2012 de la EMVS. Fuente: elaboración propia a partir de los expedientes de concesión de ayudas consultados en la EMVS.

Tabla C.2. Información detallada sobre las soluciones de rehabilitación adoptadas y la composición del elemento sobre el que se actúa. Fuente: elaboración propia a partir del estudio de los expedientes de concesión de las ayudas de la EMVS.

Tabla C.3. Edificios subvencionados por los planes REVIVE y Renove del Gobierno Vasco para mejorar la envolvente térmica del edificio en Bizkaia (zona climática C1). Fuente: elaboración propia a partir de las resoluciones de dichas ayudas (Gobierno Vasco, 2012, 2014).

Tabla C.4. Información detallada sobre las soluciones de rehabilitación adoptadas y la composición del elemento sobre el que se actúa. Fuente: elaboración propia a partir de la información proporcionada por el Gobierno Vasco.

Tabla C.5. Resultados de las concesiones de subvenciones del Plan Renove Ventanas EVE 2014. Fuente: elaboración propia a partir de los datos proporcionados por el EVE.

Tabla C.6. Edificios subvencionados por el AVRA para mejorar la envolvente térmica del edificio en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de los expedientes de concesión de ayudas del AVRA.

Tabla C.7. Información detallada sobre las soluciones de rehabilitación adoptadas y la composición del elemento sobre el que se actúa. Fuente: elaboración propia a partir de la información proporcionada por el Gobierno Vasco.

Anexo D

Tabla D.1. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del edificio sin rehabilitar (E0). Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.2. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada del edificio sin rehabilitar (E0). Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.3. Cálculo de la transmitancia térmica del suelo del edificio sin rehabilitar (E0). Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.4. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del edificio sin rehabilitar (E0). Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.5. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E1 en Madrid. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.6. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada del escenario E1 en Madrid. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.7. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E1 en Madrid. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.8. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E2A en Madrid. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.9. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada del escenario E2A en Madrid. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.10. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E2A en Madrid. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.11. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E2B en Madrid. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.12. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada del escenario E2B en Madrid.

Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.13. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E2B en Madrid.

Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.14. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E3 en Madrid. Fuente:

elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.15. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada del escenario E3 en Madrid. Fuente:

elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.16. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E3 en Madrid. Fuente:

elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.17. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E1 en Bilbao. Fuente:

elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.18. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada exterior del escenario E1 en Bilbao.

Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.19. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada de patios del escenario E1 en

Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.20. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E1 en Bilbao. Fuente:

elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.21. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E2A en Bilbao.

Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.22. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada exterior del escenario E2A en

Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.23. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada de patios del escenario E2A en

Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.24. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E2A en Bilbao.

Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.25. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E2B en Bilbao.

Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.26. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada exterior del escenario E2B en

Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.27. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada de patios del escenario E2B en

Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.28. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E2B en Bilbao.

Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.29. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E3 en Bilbao. Fuente:

elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.30. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada exterior del escenario E3 en Bilbao.

Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.31. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada de patios del escenario E3 en

Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.32. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E3 en Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013)

Tabla D.33. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E1 en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.34. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada del escenario E1 en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.35. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E1 en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.36. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E2A en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.37. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada del escenario E2A en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.38. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E2A en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.39. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.40. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada del escenario E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.41. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.42. Cálculo de la transmitancia térmica de la cubierta del escenario E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Tabla D.43. Cálculo de la transmitancia térmica de la fachada del escenario E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013)

Tabla D.44. Cálculo de la transmitancia térmica de los huecos del escenario E3 en Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir de DA DB-HE / 1 (Ministerio De Fomento, 2013).

Anexo E

Tabla E.1. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.2. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.3. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2A por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.4. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2A en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.5. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.6. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.7. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E3 por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.8. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E3 en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.9. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 por m² de vivienda en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.10. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.11. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2A por m² de vivienda en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.12. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2A en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.13. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B por m² de vivienda en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.14. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.15. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E3 por m² de vivienda en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.16. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E3 en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.17. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 por m² de vivienda en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.18. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.19. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2A por m² de vivienda en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.20. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2A en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.21. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B por m² de vivienda en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.22. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.23. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E3 por m² de vivienda en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla E.24. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E3 en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Anexo F

Tabla F.1. Resultados de los consumos de energía primaria de los escenarios de rehabilitación en el caso de estudio de Madrid, Bilbao y Sevilla, desglosado por módulos. Fuente: elaboración propia.

Tabla F.2. Resultados de los consumos de energía primaria de los escenarios de rehabilitación en el caso de estudio de Madrid, Bilbao y Sevilla, desglosado por etapas. Fuente: elaboración propia.

Tabla F.3. Resultados de los impactos ambientales de los escenarios de rehabilitación en el caso de estudio de Madrid, desglosado por módulos. Fuente: elaboración propia.

Tabla F.4. Resultados de los impactos y costes ambientales de los escenarios de rehabilitación en el caso de estudio de Madrid, desglosado por etapas. Fuente: elaboración propia.

Tabla F.5. Resultados de los impactos y costes ambientales de los escenarios de rehabilitación del caso de estudio de Madrid para la optimización multicriterio (IE y LE). Fuente: elaboración propia.

Tabla F.6. Resultados de los análisis de sensibilidad de vida útil para el caso de estudio de Madrid (IE y LE). Fuente: elaboración propia.

Tabla F.7. Resultados de los análisis de sensibilidad de los valores de monetización para el caso de estudio de Madrid (IE y LE). Fuente: elaboración propia.

Tabla F.8. Resultados de los impactos ambientales de los escenarios de rehabilitación en el caso de estudio de Bilbao, desglosado por módulos. Fuente: elaboración propia.

Tabla F.9. Resultados de los impactos y costes ambientales de los escenarios de rehabilitación en el caso de estudio de Bilbao, desglosado por etapas. Fuente: elaboración propia.

Tabla F.10. Resultados de los impactos y costes ambientales de los escenarios de rehabilitación del caso de estudio de Bilbao para la optimización multicriterio (IE y LE). Fuente: elaboración propia.

Tabla F.11. Resultados de los análisis de sensibilidad de vida útil para el caso de estudio de Bilbao (IE y LE). Fuente: elaboración propia.

Tabla F.12. Resultados de los análisis de sensibilidad de los valores de monetización para el caso de estudio de Bilbao (IE y LE). Fuente: elaboración propia.

Tabla F.13. Resultados de los impactos ambientales de los escenarios de rehabilitación en el caso de estudio de Sevilla, desglosado por módulos. Fuente: elaboración propia.

Tabla F.14. Resultados de los impactos y costes ambientales de los escenarios de rehabilitación en el caso de estudio de Sevilla, desglosado por etapas. Fuente: elaboración propia.

Tabla F.15. Resultados de los impactos y costes ambientales de los escenarios de rehabilitación del caso de estudio de Sevilla para la optimización multicriterio (IE y LE). Fuente: elaboración propia.

Tabla F.16. Resultados de los análisis de sensibilidad de vida útil para el caso de estudio de Sevilla (IE y LE). Fuente: elaboración propia.

Tabla F.17. Resultados de los análisis de sensibilidad de los valores de monetización para el caso de estudio de Sevilla (IE y LE). Fuente: elaboración propia.

Anexo G

Tabla G.1. Resultados de los costes económicos de ciclo de vida (actualizados) de los escenarios de rehabilitación, por m² de vivienda, en el caso de estudio de Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla G.2. Análisis de sensibilidad de la vida útil (v), el incremento del precio de la energía (e) y la tasa de descuento (r) de los escenarios de rehabilitación, por m² de vivienda, en el caso de estudio de Madrid, identificando aquellos que están en la curva de Pareto. Fuente: elaboración propia.

Tabla G.3. Resultados de los costes económicos de ciclo de vida (actualizados) de los escenarios de rehabilitación, por m² de vivienda, en el caso de estudio de Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla G.4. Análisis de sensibilidad de la vida útil (v), el incremento del precio de la energía (e) y la tasa de descuento (r) de los escenarios de rehabilitación, por m² de vivienda, en el caso de estudio de Bilbao, identificando aquellos que están en la curva de Pareto. Fuente: elaboración propia.

Tabla G.5. Resultados de los costes económicos de ciclo de vida (actualizados) de los escenarios de rehabilitación, por m² de vivienda, en el caso de estudio de Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla G.6. Análisis de sensibilidad de la vida útil (v), el incremento del precio de la energía (e) y la tasa de descuento (r) de los escenarios de rehabilitación, por m² de vivienda, en el caso de estudio de Madrid, identificando aquellos que están en la curva de Pareto. Fuente: elaboración propia.

Listado de figuras

Capítulo 1

Figura 1.1. Etapas del Ciclo de Vida del Edificio. Fuente: adaptado de www.ctbuh.org.

Figura 1.2. Esquema de la metodología de investigación. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 2

Figura 2.1. Influencia de las decisiones de diseño en los impactos y costes de ciclo de vida.
Fuente: Kohler y Moffat (2003).

Figura 2.2. Esquema Comité CEN TC/350 "Sustainability of construction Works". Fuente: EN 15643-1:2010.

Capítulo 3

Figura 3.1. Esquema del planteamiento metodológico para la evaluación multicriterio de las estrategias de rehabilitación. Fuente: elaboración propia.

Figura 3.2. Límites del sistema definidos para la evaluación del comportamiento ambiental y económico de las estrategias de rehabilitación. Fuente: elaboración propia.

Figura 3.3. Etapas del ciclo de vida. Fuente: adaptado de UNE-EN 15643-2:21012.

Figura 3.4. Exposición de información modular para las diferentes etapas de la evaluación de edificios. Fuente: UNE-EN 16627:2015.

Figura 3.5. Ensayo Blower Door: un ventilador colocado en la puerta principal del inmueble despresuriza el interior del mismo. Los flujos de aire exteriores entran en el edificio por cualquier filtración. Fuente: www.isocell.at.

Figura 3.6. Resultados normalizados del estudio ambiental de la rehabilitación de una cubierta en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 3.7. Variación anual IPC. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Instituto Nacional de Estadística, INE.

Figura 3.8. Variación anual del precio de los materiales de construcción y de la mano de obra
Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Instituto Nacional de Estadística, INE.

Figura 3.9. Evolución del precio de la energía para edificios residenciales. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Eurostat (2015b, 2009b, 2015a, 2009a).

Figura 3.10. Principio de optimización de Pareto para la minimización de un objetivo (f_1) y maximización del otro (f_2). Fuente: elaboración propia.

Capítulo 4

Figura 4.1. Número de viviendas según año de construcción en las principales ciudades con desarrollo industrial durante el desarrollismo. Fuente: elaboración propia a partir del Censo de Población y viviendas 2011 (Instituto Nacional de Estadística, 2015).

Figura 4.2. Selección de las ciudades a estudiar en función del tipo de clima (izda.) y la zona climática (dcha.). Fuente: elaboración propia a partir de los mapas climáticos del Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Fomento y CTE-DB HE1.

Figura 4.3. Moratalaz, Madrid (superior), vista aérea años 60; vista de los Remedios en 1963 (inferior izquierda), Sevilla; Otxarkoaga, Bilbao (inferior derecha) Boletín Estadística Villa de Bilbao, A.M.B., 1962. Fuentes: Máquez (2012), Valero Ramos y Díaz Amela (2007) y Bilbao Larrondo (2008).

Figura 4.4. Diseño urbano y tipologías en los barrios de promoción pública y privada de Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 4.5. Selección de edificios analizados. Fuente: elaboración propia a partir de fotos aéreas de *Bing Maps*.

Figura 4.6. Número de viviendas según década de construcción y número de plantas del edificio en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir del Censo de Población y viviendas 2011 (Instituto Nacional de Estadística, 2015).

Figura 4.7. Dimensiones de los módulos en "H". Fuente: elaboración propia.

Figura 4.8. Planta vivienda tipo en Moratalaz (izda.), planta tipo Nuestra Señora de Lourdes, Batán (dcha.). Fuente: Fernández Nieto (2006).

Figura 4.9. Número de viviendas según superficie útil y periodo de construcción en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir del Censo de Población y viviendas 2011 (Instituto Nacional de Estadística, 2015).

Figura 4.10. Tipos de cubierta utilizados en Madrid durante el periodo 1957-1970. Fuente: elaboración propia a partir de memorias de proyectos.

Figura 4.11. Evolución de la fachada (1957-1970). Fuente: elaboración propia a partir de memorias proyectos.

Figura 4.12. Variantes de la solución de fachada de doble hoja típica de la época: 1) Hoja exterior de fábrica de ladrillo cara vista ligeramente volada respecto al plano del forjado cuyo frente se chapea con plaqueta, cámara de aire y tabique interior enlucido. 2) Solución similar a la anterior dejando los frentes estructurales vistos. 3) Hoja exterior de fábrica de ladrillo hueco doble colocada a media asta y revestida exteriormente. 4) Se diferencia de la anterior en la disposición del ladrillo hueco doble, realizado en este caso a tabicón. Fuente: Lizundia Uranga (2012).

Figura 4.13. Soluciones de carpinterías exteriores más utilizadas: 1) Ventana de dos hojas abatibles, solución típica para dormitorio. 2) Ventana similar a la anterior con una hoja fija en la parte inferior. 3) Ventana de triple hoja, dos de ellas abatibles, con un fijo común en la parte inferior. Solución muy utilizada en salas de estar y dormitorios principales. 4) Ventana de una hoja para pequeñas estancias como baños y aseos. 5) Puerta balconera de doble hoja, utilizada habitualmente como salida al balcón desde la cocina. 6) Puerta balconera de una hoja con ventanal, típica salida desde la sala de estar. Fuente: Lizundia Uranga (2012).

Figura 4.14. Principales deficiencias térmicas encontradas en el estudio termográfico. Fuente: elaboración propia.

Figura 4.15. Descripción de los datos urbanos y funcionales del modelo de edificio definido para Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 4.16. Descripción de las propiedades constructivas del modelo de edificio definido para Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 5

Figura 5.1. Esquema del modelo de edificio: alzado, planta y sección constructiva. Fuente: Pombo et al. (2016).

Figura 5.2. Límites del sistema adoptados en los casos de estudio. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.3. Análisis climático de Madrid. Fuente: Pérez González (2015).

Figura 5.4. Escenarios a evaluar y requisitos que debe cumplir cada escenario en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.5. Porcentaje de edificios y viviendas según el elemento rehabilitado. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.6. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E1 en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.7. Parámetros característicos de la envolvente del edificio de referencia para la zona climática D3. Fuente: CTE DB-HE 1 (Ministerio de Fomento, 2013).

Figura 5.8. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2A en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.9. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2B en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.10. Instalación individual de ventilación mecánica con recuperador de calor en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.11. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E3 en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.12. Demanda energética anual de los escenarios de rehabilitación en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.13. Consumo de energía primaria de ciclo de vida (CED) de los escenarios de rehabilitación en Madrid por superficie de vivienda útil (izda.); influencia de cada etapa del ciclo de vida sobre el CED total en (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.14. Análisis comparativo de los resultados de caracterización ambiental de los escenarios de rehabilitación en Madrid según la categoría de impacto. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.15. Coste ambiental de ciclo de vida (LE) de los escenarios de rehabilitación en Madrid por m² de vivienda (izda.) e influencia de cada etapa sobre el coste ambiental de ciclo de vida (LE) completo (dcha.) Fuente: elaboración propia.

Figura 5.16. Valor actual (VA) de los flujos de caja de los escenarios de rehabilitación en Madrid a lo largo del ciclo de vida. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.17. Resultados de la optimización multicriterio en Madrid, en base a los objetivos definidos. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro), coste de inversión (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.18. Análisis de sensibilidad de la vida útil en Madrid. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (izda.); coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.19. Análisis de sensibilidad de los valores monetarios en Madrid Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) para valores de monetización inferiores, centrales y superiores. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.20. Análisis de sensibilidad de la tasa de descuento y el incremento del precio de la energía en Madrid. Coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para distintas tasas de crecimiento del precio de la energía (3,5%, 1,75% y 0%) (izda.); coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para tasas de descuento del 2%, 3% y 4% (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.21. Análisis climático Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir de los datos climáticos de Aemet.

Figura 5.22. Escenarios a evaluar y requisitos que debe cumplir cada escenario en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.23. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E1 en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.24. Parámetros característicos de la envolvente del edificio de referencia para la zona climática C1. Fuente: CTE DB-HE 1 (Ministerio de Fomento, 2013).

Figura 5.25. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2A en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.26. Demanda de calefacción para las dos soluciones planteadas en el escenario E2B en Bilbao, según las infiltraciones establecidas. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.27. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2B en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.28. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E3 en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.29. Instalación individual de ventilación mecánica con recuperador de calor en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.30. Demanda energética de calefacción de los escenarios planteados en Bilbao, señalando la demanda límite en cada caso en líneas discontinuas. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.31. Consumo de energía primaria de ciclo de vida (CED) de los escenarios de rehabilitación en Bilbao, por superficie de vivienda útil (izda.); influencia de cada etapa del ciclo de vida sobre el CED total en Bilbao (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.32. Análisis comparativo de los resultados de caracterización ambiental de los escenarios de rehabilitación en Bilbao según la categoría de impacto. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.33. Análisis del coste ambiental de ciclo de vida (LE) de los escenarios de rehabilitación en Bilbao (izda.); influencia de cada etapa al coste ambiental de ciclo de vida (LE) en Bilbao (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.34. Valor actual (VA) de los flujos de caja de los escenarios de rehabilitación a lo largo de la vida útil en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.35. Resultados de la optimización multicriterio en Bilbao, en base a los objetivos definidos. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.); coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro); coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.36. Análisis de sensibilidad de los valores monetarios y la vida útil en Bilbao. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) para valores de monetización bajos, centrales y superiores (izda.); coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (ahorros LE) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.37. Análisis de sensibilidad del incremento del precio de la energía y la vida útil en Bilbao. Coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para distintas tasas de crecimiento del precio de la energía (3,5%, 1,75% y 0%) (izda.); coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.38. Análisis de sensibilidad de la tasa de descuento en Bilbao. Coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para distintas tasas de descuento (2%, 3% y 4%). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.39. Análisis climático de Sevilla. Fuente: Pérez González (2015).

Figura 5.40. Escenarios a evaluar y requisitos que debe cumplir cada escenario en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.41. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E1 en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.42. Parámetros característicos de la envolvente del edificio de referencia para la zona climática B4. Fuente: CTE DB-HE 1 (Ministerio de Fomento, 2013).

Figura 5.43. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2A en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.44. Definición del elemento de sombreado adecuado para un hueco orientado a norte en Sevilla. Fuente: Pérez González (2015).

Figura 5.45. Definición del elemento de sombreado adecuado para un hueco orientado a sur en Sevilla. Fuente: Pérez González (2015).

Figura 5.46. Definición del tipo de hueco en la fachada sur en función de las sombras arrojadas en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.47. Dimensiones de las protecciones solares según los tipos de hueco, para el edificio de estudio en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.48. Definición del elemento de sombreado adecuado para un hueco orientado a este en Sevilla. Fuente: Pérez González (2015).

Figura 5.49. Dimensiones de las protecciones solares en orientación este, para el edificio de estudio en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.50. Máscara de sombra relativa a la orientación oeste en Sevilla (izda.) y elemento seleccionado para el edificio de estudio (dcha.). Fuentes: Pérez González (2015) y www.tamiluz.es.

Figura 5.51. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.52. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E3 en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.53. Instalación individual de ventilación mecánica con recuperador de calor en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.54. Demanda energética de calefacción (izda.) y refrigeración (dcha.) de los escenarios de rehabilitación. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.55. Consumo de energía primaria de ciclo de vida (CED) de los escenarios de rehabilitación en Sevilla por superficie de vivienda útil (izda.); influencia de cada etapa del ciclo de vida sobre el CED total (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.56. Análisis comparativo de los resultados de caracterización ambiental de los escenarios de rehabilitación en Sevilla, según la categoría de impacto. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.57. Análisis del coste ambiental de ciclo de vida (LE) de los escenarios de rehabilitación en Sevilla (izda.); influencia de cada etapa al coste ambiental de ciclo de vida (LE) (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.58. Valor actual (VA) de los flujos de caja de los escenarios de rehabilitación en Sevilla a lo largo de la vida útil. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.59. Resultados de la optimización multicriterio en Sevilla, en base a los objetivos definidos. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.); coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro); coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.60. Análisis de sensibilidad de los valores monetarios y la vida útil en Sevilla. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) para valores de monetización inferiores, centrales y superiores (izda.); coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.61. Análisis de sensibilidad de la tasa de descuento en Sevilla. Coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para distintas tasas de crecimiento del precio de la energía (3,5%, 1,75% y 0%) (izda.); coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.62. Análisis de sensibilidad de la tasa de descuento en Sevilla. Coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para distintas tasas de descuento (2%, 3% y 4%). Fuente: elaboración propia.

Figura 5.63. Análisis comparativo de la demanda energética total (calefacción + refrigeración) de las ciudades analizadas según los escenarios de rehabilitación. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.64. Análisis comparativo del consumo de energía primaria de ciclo de vida (CED) de los escenarios de rehabilitación. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.65. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro) y coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.) de las soluciones de rehabilitación del escenario E1, en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.66. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro) y coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.) de las soluciones de rehabilitación del escenario E2A, en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.67. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro) y coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.) de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B, en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.68. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro) y coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.) de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B, en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Capítulo 6

Figura 6.1. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro) y coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.) de las soluciones de rehabilitación del escenario E1, en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 6.2. Relación entre el coste de inversión y los ahorros ambientales y económicos entre los escenarios E2A y E2B en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 6.3. Relación entre el coste de inversión y los ahorros ambientales y económicos entre los escenarios E2A y E2B en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Figura 6.4. Relación entre el coste de inversión y los ahorros ambientales y económicos entre los escenarios E2A y E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 6.5. Coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) de los escenarios de rehabilitación en Madrid (izda.), Bilbao (centro) y Sevilla (dcha.). Fuente: elaboración propia.

English summary

Chapter 1

Figure 1.1. Life cycle phases of the building. Source: author.

Figure 1.2. Scheme of the proposed methodology. Source: author.

Chapter 6

Figure 6.1. Initial Environmental cost (IE) vs. Life cycle Environmental savings (LE savings) (left); Initial Financial cost (IF) vs. Life cycle Financial savings (LF savings) (center); Initial Financial cost (IF) vs. Life cycle Environmental savings (LE savings) (right) of the retrofitting solutions of scenario E1, in Madrid, Bilbao and Seville. Source: author.

Figure 6.2. Relation between Initial Financial cost (IF) and the Life cycle Environmental (LE) and Financial (LF) savings, between scenarios E2A and E2B in Madrid. Source: author.

Figure 6.3. Relation between Initial Financial cost (IF) and the Life cycle Environmental (LE) and Financial (LF) savings, between scenarios E2A and E2B in Bilbao. Source: author.

Figure 6.4. Relation between Initial Financial cost (IF) and the Life cycle Environmental (LE) and Financial (LF) savings, between scenarios E2A and E2B in Seville. Source: author.

Figure 6.5. Initial environmental cost (IE) vs. life cycle environmental savings (LE savings) (left), initial financial cost (IF) vs. life cycle financial savings (LF savings) (center) y initial financial cost (IF) vs. life cycle environmental savings (LE savings) (right) of the retrofitting solutions of scenario E1, in Madrid, Bilbao and Seville. Source: author.

Capítulo 1

Introducción

Introduction

En este capítulo, se presenta el contexto general en el que se lleva a cabo la investigación.

Actualmente, la mejora de la eficiencia energética del parque edificado es una prioridad. A nivel nacional, en los últimos años se han llevado a cabo diversos programas para la promoción de la rehabilitación energética del parque construido. Sin embargo, se centra únicamente en el ahorro energético durante la fase de uso. Esta investigación comienza al cuestionarse si las estrategias de rehabilitación que se están aplicando actualmente se considerarían eficientes, si se incorporase el Enfoque de Ciclo de Vida.

Partiendo de esta premisa, se plantea la hipótesis de la investigación, así como los objetivos que permitan confirmar dicha hipótesis.

Por último, se expone la metodología seguida para la consecución de los mencionados objetivos y que estructura el presente documento.

In this chapter, the general context of the research is presented.

Nowadays, the improvement of the energy efficiency of the built environment is a priority. In the recent years, several programs have been conducted in Spain with the aim of promoting energy efficient building renovation. However, energy improvement is assessed only in terms of energy savings during the use phase, without considering the impact of the renovation process, among others. This research comes from the question whether the retrofitting solutions currently used in Spain would consider efficient if the Life Cycle Approach would be considered.

On this basis, the hypothesis of the research is presented, as well as the objectives that enable the demonstration of the hypothesis.

Finally, the methodology followed in this study in order to achieve the proposed objectives is exposed.

1.1. Justificación de la investigación

La edificación es un sector de enorme influencia en la evolución del consumo de energía y las emisiones de CO₂ (Pombo et al., 2014). En el conjunto de la Unión Europea, los edificios son responsables del 40% del consumo de energía final y del 36% de las emisiones de CO₂ (Cuchí y Sweatman, 2012b). La rehabilitación del parque existente ofrece excelentes oportunidades para reducir el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero. Un porcentaje muy alto del parque residencial europeo actual se construyó durante las décadas de los 40 y 70 del pasado siglo, con estándares de calidad bajos, especialmente en relación al comportamiento energético (Häkkinen, 2012). En España, el 54% del parque residencial es anterior a 1980 (Instituto Nacional de Estadística, 2015), es decir, anterior a la primera Norma Básica de la edificación “NBE-CT-79” sobre Condiciones Térmicas en los Edificios. Este gran porcentaje es consecuencia de las grandes necesidades de vivienda a mediados del siglo pasado, en un contexto de escasa fabricación industrial y sin ningún estándar de confort. La mejora de estos edificios es, por tanto, un reto importante y urgente.

Son muchos los autores que han resaltado la importancia de la rehabilitación para reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂ (Nemry et al., 2010; Dall'O' et al., 2012b; Ahern et al., 2013; Mata et al., 2013b; Cuchí y Pagès, 2007; Cuchí y Sweatman, 2011b, 2012b). El aumento de eficiencia en el parque edificado es la única fuente de reducción de emisiones, puesto que la eficiencia energética en la nueva edificación sólo coadyuva a reducir el incremento de emisiones del sector, pero no a disminuirlo. Y, en cualquier escenario de futuro de reducción de emisiones –y, sobre todo, antes de que tomen mayor protagonismo las alternativas eficientes en la generación de energía con baja emisividad– la eficiencia es la estrategia clave en la lucha contra el cambio climático (Cuchí y Pagès, 2007).

Teniendo en cuenta que en estos momentos hay 3,5 millones de viviendas vacías (Instituto Nacional de Estadística, 2013) y que los próximos años no va a haber un aumento en la demanda de vivienda nueva (Cuchí y Sweatman, 2011b), la rehabilitación sostenible del parque edificatorio existente es una tarea prioritaria, a la que es necesario prestar especial interés. La mejora de la eficiencia energética debe constituir el eje sobre el que se reformule el sector de la edificación en España para ahorrar energía, mejorar la calidad de vida en los hogares, y cumplir con los objetivos propuestos por la Unión Europea en materia de ahorro de energía y emisiones de CO₂.

La adhesión al Protocolo de Kioto, le ha llevado a la unión Europea a adoptar medidas, para cumplir su compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (20% respecto a los niveles de 1990), el consumo energético (20%) y aumentar el uso de energías renovable (20%) para 2020. En este sentido, la aprobación de la Directiva 2002/91/CE, derogada posteriormente por la Directiva 2010/31/UE (también conocidas como EPBD, Energy Performance of Buildings Directive) relativa a las medidas necesarias para reducir el consumo de energía en la Unión Europea y su necesaria transposición a nivel nacional, ha provocado que las administraciones públicas comenzaran a tomar medidas.

A nivel nacional, el Ministerio de Fomento formuló el “Plan Estatal de Vivienda y Rehabilitación 2009-2012” y las actuaciones contempladas en el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética 2008-2012 (PAEE+). Esto derivó en que las Comunidades Autónomas publicasen sus propias guías de rehabilitación, apareciendo así la “Guía de rehabilitación energética de edificios de viviendas”, publicada en 2008 por la Comunidad de Madrid, o la “Guía de la Edificación y la Rehabilitación sostenible en la Comunidad Autónoma del País Vasco”, revisada en 2011. Además, algunas Comunidades Autónomas empezaron ya a publicar sus estrategias hacia el horizonte 2020. Así, en Cataluña se ha publicado el “Plan Estratégico de la Energía y Cambio Climático 2020”. El Gobierno Vasco, por su parte, tiene ya su “Hoja de Ruta de Edificación Sostenible del País Vasco, Bultzatu 2025”.

El pasado 1 de junio de 2013, se aprobó el Real Decreto 235/2013 de Certificación de Eficiencia Energética de Edificios que, junto con la Ley de Rehabilitación, Regeneración y Renovación Urbanas, pretenden impulsar y concienciar a la sociedad de la necesidad de mejorar el parque residencial existente, en términos de ahorro energético y emisiones de CO₂. Recientemente, se ha aprobado el programa PAREER-CRECE con el fin de incentivar y promover las actuaciones de rehabilitación que favorezcan el ahorro energético, la mejora de la eficiencia energética, el aprovechamiento de las energías renovables y la reducción de emisiones de dióxido de carbono, en los edificios existentes, así como contribuir a alcanzar los objetivos establecidos en la Directiva 2012/27/UE, relativa a la eficiencia energética, y en el Plan de Acción 2014-2020. Las actuaciones objeto de ayuda deben mejorar la calificación energética en al menos una letra, medida en la escala de emisiones de dióxido de carbono (kg CO₂/m² año), con respecto a la calificación energética inicial del edificio.

Todas estas iniciativas contemplan únicamente el ahorro energético y emisiones de CO₂ durante la fase de uso. Sin embargo, algunas investigaciones revelan que a medida que se reduce el consumo energético durante la fase de uso, el resto de fases adquieren mayor importancia, llegando a ser comparables entre sí (Ardente et al., 2011).

Adicionalmente, cabe precisar que si bien el cambio climático constituye un elemento de gran relevancia, ha de analizarse un espectro más amplio de impactos ambientales, para poder caracterizar el comportamiento ambiental global.

De igual manera, las valoraciones económicas de las soluciones a aplicar en el edificio, atienden únicamente al coste inicial y a los ahorros económicos. No se considera, en cambio, el coste de mantenimiento que, si no se elige la solución adecuada, puede suponer que una inversión no se amortice jamás. En definitiva, no se tiene en cuenta el comportamiento del edificio durante todo el ciclo de vida.

Figura 1.1. Etapas del ciclo de vida del Edificio. Fuente: adaptado de www.ctbuh.org.

Suplir esta carencia hace necesario revisar las estrategias de rehabilitación energética que se están aplicando en el contexto edificatorio español desde la perspectiva de Ciclo de Vida.

1.2. Hipótesis

Se plantea como **hipótesis de partida** que las **medidas de rehabilitación energética** que se están aplicando **actualmente** en el contexto edificatorio español podrían **cuestionarse** si se incorpora el punto de vista **ambiental y económico**, desde la **perspectiva de Ciclo de Vida**.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo principal

El objetivo principal de la investigación es el desarrollo de una **metodología multicriterio** para el **análisis comparativo** de la eficiencia de las **estrategias actuales de rehabilitación**, combinando la evaluación del **comportamiento energético, ambiental y económico** mediante el uso de **enfoque de Ciclo de Vida**.

1.3.2. Objetivos específicos

Paralelamente al objetivo general descrito, se definen una serie de objetivos específicos que se resumen a continuación, refiriéndose al capítulo en el que han sido abordados:

Objetivo 1

Revisión crítica de los trabajos de investigación relativos a la rehabilitación de viviendas que han sido desarrollados en los últimos años, con el objetivo de **caracterizar el panorama de investigación a nivel internacional** e identificar el estado de la cuestión en relación a las medidas de rehabilitación y las metodologías de evaluación, extrayendo conclusiones e identificando las necesidades de actuación.

Objetivo 2

Propuesta metodológica para la **evaluación** energética, ambiental y económica de las **estrategias de rehabilitación** aplicadas en edificios residenciales, mediante el **enfoque de Ciclo de Vida**.

Objetivo 3

Caracterización de las **soluciones de rehabilitación** empleadas hasta el momento en distintas zonas geográficas con climas diferenciados, dentro del **parque de viviendas más representativo** con necesidad de rehabilitación en el corto plazo.

Objetivo 4

Evaluación de las **actuaciones de rehabilitación actuales**, a través de casos de estudio, con el fin de determinar si estas acciones representan una **mejora real** y si las **políticas** son **pertinentes**.

1.4. Metodología

La metodología planteada en la presente investigación para cumplir los objetivos y la hipótesis de partida, se ha desarrollado en cuatro puntos, que atienden a los objetivos específicos y al contenido del presente documento (Figura 1.2).

Figura 1.2. Esquema de la metodología de investigación. Fuente: elaboración propia.

El primer paso para poder desarrollar la metodología multicriterio ha sido la revisión de los trabajos de investigación relacionados con la rehabilitación de viviendas, con el fin de poder caracterizar el panorama internacional en relación a las estrategias de rehabilitación y las metodologías de evaluación, así como el marco normativo actual. Este análisis del estado de la cuestión se describe en el capítulo 2 del presente documento.

Partiendo del estado de la cuestión, se ha realizado una revisión crítica de las metodologías de evaluación, con el fin de adoptar las bases metodológicas y las hipótesis de partida ya consensuadas y asentadas en la comunidad científica. A partir de las conclusiones obtenidas en este análisis, se ha procedido al planteamiento metodológico para la evaluación de las estrategias de rehabilitación de viviendas, integrando la evaluación energética, ambiental y económica desde la perspectiva del ciclo de vida. Este avance del trabajo se ha reflejado en el capítulo 3.

Dado que con esta investigación se pretende identificar si las estrategias de rehabilitación actuales son eficientes cuando se incorpora el Análisis ambiental y económico de Ciclo de Vida, se han seleccionado unos casos de estudio (capítulo 4), a

partir de un modelo representativo del parque de viviendas con necesidad de rehabilitación a corto plazo, situándolo en distintas zonas climáticas y distintos contextos geográficos.

Estos casos de estudio son evaluados mediante la metodología desarrollada para el análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación, permitiendo determinar cuáles son las estrategias de rehabilitación más adecuadas en cada caso (capítulo 5).

Por último, el capítulo 6 recoge las conclusiones generales de la investigación, así como las conclusiones parciales obtenidas a lo largo de la tesis. Adicionalmente, se han planteado las futuras líneas de investigación derivadas el presente trabajo, así como la producción científica que, como se observa al inicio de cada capítulo, ha ido en paralelo al desarrollo de la investigación. Esto ha permitido obtener *feedback* de expertos internacionales que han contribuido a la mejora del trabajo.

1.5. Bibliografía

- AHERN, C., GRIFFITHS, P. y O'FLAHERTY, M., 2013. State of the Irish housing stock—Modelling the heat losses of Ireland's existing detached rural housing stock & estimating the benefit of thermal retrofit measures on this stock. *Energy Policy*, vol. 55, pp. 139-151. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2012.11.039.
- ARDENTE, F., BECCALI, M., CELLURA, M. y MISTRETTA, M., 2011. Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 460-470. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2010.09.022.
- CUCHÍ, A. y PAGÈS, A., 2007. Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).
- CUCHÍ, A. y SWEATMAN, P., 2011b. Una visión-país para el sector de la edificación en España. Hoja de ruta para un nuevo sector de la vivienda.
- CUCHÍ, A. y SWEATMAN, P., 2012b. *Informe GTR 2012 : una visión-país para el sector de la edificación en España : plan de acción para un nuevo sector de la vivienda*. ISBN 978-84-616-1917-7.
- DALL'O', G., GALANTE, A. y TORRI, M., 2012b. A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy and Buildings*, vol. 48, pp. 211-219. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.01.034.
- HÄKKINEN, T., 2012. Systematic method for the sustainability analysis of refurbishment concepts of exterior walls. *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 783-790. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.084.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, 2013. Censos de Población y Viviendas 2011. Edificios y viviendas. Datos provisionales.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, 2015. Censos de Población y Viviendas 2011. Disponible en: http://www.ine.es/censos2011_datos/cen11_datos_inicio.htm.
- MATA, É., SASIC KALAGASIDIS, A. y JOHNSON, F., 2013b. Energy usage and technical potential for energy saving measures in the Swedish residential building stock. *Energy Policy*, vol. 55, pp. 404-414. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2012.12.023.
- NEMRY, F., UIHLEIN, A., COLODEL, C.M., WETZEL, C., BRAUNE, A., WITTSTOCK, B., HASAN, I., KREISSI, J., GALLON, N., NIEMEIER, S. y FRECH, Y., 2010. Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs. *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 7, pp. 976-984. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.01.009.

POMBO, O., NEILA, J. y RIVELA, B., 2014. Vivienda de posguerra en España. La rehabilitación como herramienta para una arquitectura más sostenible. *Ambitat*, no. 14, pp. 7-13.

Capítulo 2

Estado de la cuestión

State of the art

El presente capítulo aborda una revisión crítica sobre las investigaciones llevadas a cabo en el ámbito de la rehabilitación residencial y analiza los enfoques considerados en la evaluación de las medidas de eficiencia energética.

La revisión cubre, en primer lugar, estudios que analizan distintas medidas de rehabilitación, trabajos que desarrollan metodologías de evaluación e investigaciones que estudian el potencial de ahorro energético y emisiones de CO₂ del parque edificado a escala macro.

Una vez caracterizado el panorama internacional, se estudia cómo ha sido la rehabilitación a nivel nacional.

Finalmente, se realiza un recorrido por la normativa relativa a la edificación a nivel europeo y nacional, con el fin de identificar el marco normativo vigente.

This chapter presents a critical review of the research undertaken on housing renovation and discusses the approaches considered within the assessment of energy-efficiency measures.

The research under review covers, in a first approach, studies that have analyzed different energy saving measures, works developing assessment methodologies for housing retrofitting, and macro-scale level research, where the potential for energy saving and reduction of CO₂ emissions in the existing housing stock is analyzed.

Once the international overview is characterized, the housing renovation at national level is studied.

Finally, European and national building regulations are assessed with the aim of identifying the existing regulatory framework.

Publicaciones y congresos

- **POMBO, O.**, RIVELA, B. y NEILA, J., 2014. Is building renovation truly sustainable? The need for applying a multi-criteria assessment through life cycle approach. *World SB14 Barcelona*. Barcelona, pp. 16-22.
- **POMBO, O.**, RIVELA, B. y NEILA, J., 2015. The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.137>.

2.1. Introducción

Las investigaciones llevadas a cabo para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de los edificios han aumentado exponencialmente en los últimos años (Nemry et al., 2010; Dall'O' et al., 2012b; Ahern et al., 2013; Mata et al., 2013b). Como bien se sabe, la rehabilitación del parque edificado es una prioridad para Europa y los países desarrollados. Sin embargo, hay ciertos elementos clave que deben ser abordados adecuadamente para que se produzca una mejora efectiva: ¿cuáles son los criterios que se están adoptando actualmente en la evaluación de las medidas de eficiencia energética? ¿Son estos criterios adecuados?

En los últimos años, numerosos autores han analizado el potencial que tiene la rehabilitación del parque residencial existente en términos de reducción de consumo energético y de emisiones de gases de efecto invernadero. A continuación, se describen brevemente algunos de estos estudios:

Nemry et al. (2010) analizaron el potencial del parque residencial europeo para reducir los impactos ambientales y los costes económicos desde el Enfoque de Ciclo de Vida. Los resultados mostraron que la mejora de la envolvente (aislamiento térmico en cubiertas y fachadas, así como nuevos sellados con el fin de reducir las infiltraciones) tenía un gran potencial para la mejora ambiental. Para la mayoría de los edificios, representaba al menos un 20% en comparación con el edificio sin rehabilitar. A través de un caso de estudio en Italia, Dall'O et al. (2012a) desarrollaron una metodología para evaluar el potencial de ahorro energético de los edificios residenciales en un municipio. Observaron que el escenario de rehabilitación actual suponía una reducción de tan solo un 2,7%, mientras que con el escenario óptimo era posible alcanzar unos ahorros energéticos del 24,8%.

Ahern et al. (2013) estimaron el beneficio de la implementación de medidas pasivas en la rehabilitación del parque residencial irlandés, incluyendo medidas de mejora de los muros y de las tasas de infiltración. Los costes de calefacción y emisiones de CO₂ se calcularon en base al método de análisis DEAP (*Dwelling Energy Assessment Procedure*), procedimiento oficial para el cálculo energético en Irlanda. De acuerdo a su estudio, estas medidas de rehabilitación tenían el potencial de reducir los costes de calefacción y las emisiones de CO₂ en un 65% para viviendas unifamiliares construidas antes de 1979, y en torno a un 26% para viviendas más recientes.

Mata et al. (2013b) emplearon un método *bottom-up* (2013a) para evaluar la aplicación de un amplio espectro de medidas de ahorro energético en edificios residenciales en Suecia (aislamiento de la envolvente, cambio de ventanas, reducción de las

temperaturas interiores a 20°C, sistemas de recuperación de calor, etc.). Estas medidas tenían el potencial de reducir la demanda de energía final del sector residencial sueco en un 53%.

El sector de la construcción juega un papel clave en el desarrollo sostenible global. Las estrategias para hacer que los edificios sean más sostenibles deberían basarse principalmente en el Enfoque de Ciclo de Vida, cubriendo los tres aspectos principales de la sostenibilidad: ambiental, económico y social (Gervásio et al., 2014). El uso de este enfoque desde el inicio de la fase de diseño es fundamental, dado que las decisiones que más influyen en el comportamiento del edificio a lo largo de su ciclo de vida, se toman al principio del proceso de diseño. Como se muestra en la Figura 2.1, cuanto antes se realiza el análisis, la posibilidad de influenciar, de manera efectiva, en el comportamiento ambiental y económico del ciclo de vida del edificio, es mayor (Wittstock et al., 2012; Kohler y Moffatt, 2003).

Figura 2.1. Influencia de las decisiones de diseño en los impactos y costes de ciclo de vida. Fuente: Kohler y Moffat (2003).

A nivel Europeo, son muchas las iniciativas que se han llevado a cabo para establecer la metodología de evaluación de la sostenibilidad en edificación, duplicando esfuerzos y sin llegar a una metodología consensuada final. En este sentido, cabe destacar los proyectos Openhouse, SuperBuildings, LEnSE, etc., aunque éstos no estaban pensados específicamente para rehabilitación. Recientemente, a nivel nacional, se ha desarrollado el proyecto SOFIAS (Zabalza et al., 2014), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad. En este proyecto se ha desarrollado un software para asistir a los profesionales del sector de la construcción en el diseño sostenible de nuevos edificios y la rehabilitación de los ya existentes, de manera que se reduzca su consumo total de energía y sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), consiguiendo con ello que tengan un menor impacto medioambiental a lo largo de todo su ciclo de vida. Sin bien se considera el ciclo de vida completo del edificio, se abarca un espectro limitado de los impactos ambientales. Además, la herramienta evalúa el Coste de Ciclo de Vida, pero no combina los resultados económicos y ambientales.

2.2. Soluciones de rehabilitación y criterios de evaluación en el ámbito residencial

La gran preocupación por la mejora del parque edificado ha sido objeto de numerosos estudios y proyectos a nivel internacional. La revisión bibliográfica se ha centrado en la rehabilitación del parque residencial. Con el fin de poder entender mejor el panorama actual de las soluciones de rehabilitación y los criterios de evaluación que se están aplicando, se han seleccionado los trabajos relativos a la rehabilitación de viviendas que definen el método de evaluación, las estrategias de rehabilitación, y lo aplican a un caso de estudio.

La Tabla 2.1 sintetiza 42 estudios seleccionados en este ámbito, identificando el tipo de vivienda, los criterios de evaluación y las medidas de eficiencia energética. El tipo de vivienda se ha clasificado en tres grupos: vivienda unifamiliar, bloque de viviendas o parque residencial, que cubre un análisis a nivel macro, donde no se identifica un tipo de vivienda concreto. Los criterios de evaluación se han agrupado de acuerdo con los tres pilares de la sostenibilidad: ambiental, económico y social. Por último, las medidas de eficiencia energética se han categorizado en soluciones de mejora de la envolvente térmica, mejora de las instalaciones e implementación de energías renovables. Los autores se han ordenado por año de la investigación con el fin de identificar si existe o no un desarrollo en los criterios de evaluación y las medidas de rehabilitación. El periodo considerado para la selección de las investigaciones relevantes ha sido a partir de 1980 donde, tras la primera crisis del petróleo, varios estudios identificaron las oportunidades y las barreras para el ahorro energético en edificios de viviendas (OTA, 1982; Bleviss y Gravitz, 1984).

En esta primera tabla se puede observar que, independientemente del tipo de vivienda, casi todas las investigaciones evalúan estrategias pasivas, como son la mejora de la envolvente. Además, algunos analizan la mejora de las instalaciones. Por último, tan sólo unos pocos implementan energías renovables. En cuanto a los criterios de evaluación, son muchos los autores que combinan el análisis ambiental y económico, mientras que la dimensión social se deja de lado.

A fin de poder profundizar en el análisis de estos trabajos, se han agrupado en función del criterio de evaluación (ambiental, económica y multicriterio), comparando los indicadores evaluados en cada trabajo, así como las estrategias de rehabilitación consideradas.

Tabla 2.1. Resumen de las investigación de rehabilitación de viviendas seleccionadas, clasificadas según el tipo de vivienda, los criterios de evaluación y las estrategias de eficiencia energética.

Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Referencia	País	Tipo de vivienda			Criterios de evaluación			Medidas de eficiencia energética		
		VU	VC	PR	Ambiental	Económico	Social	Envolve- nte	Instala- ciones	Energías renovables
Goldman et al. (1988)	EE.UU		✓		✓			✓	✓	
Cohen et al. (1991)	EE.UU	✓			✓	✓		✓	✓	
Gorgolewski (1995)	Reino Unido		✓			✓		✓	✓	
Jaggs et al. (2000)	Grecia		✓		✓	✓		✓	✓	✓
Goodacre et al.(2002)	Reino Unido			✓		✓			✓	
Papadopoulos (2002)	Grecia		✓			✓		✓	✓	
Al-Ragom (2003)	Kuwait	✓			✓	✓		✓		
Alanne (2004)	Finlandia		✓		✓	✓	✓	✓	✓	
Gaterell y McEvoy (2005a)	Reino Unido	✓			✓			✓		
Gaterell y McEvoy (2005b)	Reino Unido	✓				✓		✓		
Mahlia et al. (2005)	Malasia			✓	✓	✓			✓	
Verbeek y Hens (2005)	Bélgica	✓			✓	✓		✓		✓
Amstalden et al. (2007)	Suiza	✓				✓		✓		
Martinaitis et al. (2007)	Lituania		✓			✓		✓	✓	
Stovall et al. (2007)	EE.UU		✓		✓			✓		
Hasan et al. (2008)	Finlandia	✓				✓		✓		
Diakaki et al. (2008, 2010)	Grecia			✓	✓	✓		✓	✓	✓
Dodoo et al. (2010)	Suecia		✓		✓			✓	✓	
Magnier y Haghighat (2010)	Canadá	✓			✓		✓	✓	✓	
Nemry et al. (2010)	UE-25	✓	✓		✓	✓		✓		
Ouyang et al. (2011b)	China		✓		✓			✓		
Ouyang et al. (2011a)	China		✓			✓		✓		
Asadi et al. (2012b)	Portugal	✓			✓	✓		✓		✓
Byman et al. (2012)	Suecia		✓			✓		✓	✓	
Bin y Parker (2012)	Canadá	✓						✓		✓
Bojic et al. (2012)	Serbia	✓			✓	✓		✓		
Dall'O et al. (2012a)	Italia			✓	✓	✓		✓		
Häkkinen (2012)	EU-25			✓	✓	✓		✓		
Beccali et al. (2013)	Italia	✓			✓			✓	✓	✓
Brown et al. (2013)	Suecia		✓		✓	✓		✓	✓	
Cellura et al. (2013a)	Italia			✓	✓			✓	✓	✓
Desogus et al. (2013)	Italia	✓				✓		✓		
Mata et al. (2013a)	Suecia	✓	✓		✓			✓	✓	
Paiho et al. (2013)	Moscú		✓		✓			✓	✓	
Risholt et al. (2013)	Noruega	✓			✓	✓	✓	✓		
Vrijders y Wastiels (2013)	Bélgica	✓			✓	✓		✓	✓	✓
De Angelis et al. (2013)	Italia		✓		✓	✓		✓		
Ostermeyer (2013)	Francia		✓		✓	✓		✓	✓	
Assiego de Larriva et al. (2014)	España		✓		✓			✓	✓	
Antipova et al. (2014)	Portugal	✓			✓	✓		✓		✓
Buratti et al. (2014)	Italia	✓			✓			✓		
Cetiner y Edis (2014)	Turquía		✓		✓	✓		✓		

VU: vivienda unifamiliar; VC: vivienda colectiva; PR: parque residencial.

2.2.1. Evaluación ambiental

La Tabla 2.2 recoge los trabajos de investigación que evalúan la rehabilitación de edificios residenciales desde la perspectiva ambiental. Según la tabla, parece que las medidas pasivas más comunes son el aislamiento de la envolvente, el cambio de ventanas y el sellado de infiltraciones. Algunos autores también se centran en la mejora de las instalaciones, mientras que el uso de energías renovables es todavía bajo.

Tabla 2.2. Resumen de los trabajos de investigación seleccionados que evalúan con criterios ambientales las medidas de eficiencia energética aplicadas en rehabilitación de viviendas. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Referencia	País	Indicadores	Unidades	Medidas de eficiencia energética
Goldman et al. (1988)	EE.UU	Análisis de los datos medidos de la base de datos	MBtu/unidad kWh/unidad	Sustitución de ventanas Aislamiento del acumulador Instalación de cabezales de bajo flujo
Gaterell y McEvoy (2005a)	Reino Unido	Simulación energética	kWh	Aislamiento de cubierta Persianas aislantes Vidrios dobles Aislamiento de la cámara de aire
Stovall et al. (2007)	EE.UU	Modelado energético	Ahorro de energía (%)	Aislamiento de fachada
Dodoo et al. (2010)	Suecia	Pruebas experimentales AECV	kWh/m ²	Sustitución de ventanas y sellado Aislamiento de la envolvente VM con recuperación de calor Grifos de agua caliente eficientes
Ouyang et al. (2011b)	China	Ahorro energético ACV-CO ₂	kWh kg	Sustitución de ventanas Persianas o cortinas móviles
Bin and Parker (2012)	Canadá	ACV HC	Gha	Aislamiento de la envolvente Sellado Sustitución de ventanas y puertas Energías renovables
Beccali et al. (2013)	Italia	ACV	GJ	Aislamiento de la envolvente Paneles fotovoltaicos Caldera de condensación
Cellura et al. (2013a)	Italia	Modelo de "input-output" combinado con ACV	GJ Kt(CO ₂)	Aislamiento de la envolvente Caldera de condensación Colectores solares térmicos
Mata et al. (2013a)	Suecia	Uso de energía Emisiones de CO ₂	TWh tCO ₂ /año	Aislamiento de la envolvente Sustitución de ventanas VM con recuperación de calor Reducción de uso de agua caliente Reducción de la temperatura interior
Paiho et al. (2013)	Moscú	Consumo de energía anual	kWh/a kg/a(CO ₂)	Aislamiento de la envolvente Sustitución de ventanas y puertas Ventilación Mejora de la tasa de infiltración Consumo de agua
Assiego de Larriva et al. (2014)	España	ACV	MJ kgCO ₂ eq	Aislamiento de la envolvente Sustitución de ventanas Sistema de ventilación mecánica
Buratti et al. (2014)	Italia	Simulación energética (EnergyPlus y TRNSYS, calibración del modelo)	kWh/m ² año	Sustitución de vidrios Paquete de soluciones innovadoras (p. ej. sistemas de vidrios innovadores con cámara rellena de aerogel de sílice)

AECV: Análisis Energético de Ciclo de Vida; ACV-CO₂: Análisis de Ciclo de Vida de CO₂; HC: huella de carbono; Gha: hectáreas globales; VM: ventilación mecánica.

El comportamiento energético es uno de los principales temas considerados en la rehabilitación energética (Goldman, 1988; Mahlia et al., 2005). En este sentido, las herramientas informáticas se han utilizado de forma generalizada para cuantificar la eficiencia de las acciones (Assiego de Larriva et al., 2014; Beccali et al., 2013; Bin y Parker, 2012; Buratti et al., 2014; Gaterell y McEvoy, 2005a; Ouyang et al., 2011b; Paiho et al., 2013; Stovall et al., 2007). Sin embargo, el consumo energético, así como las emisiones de CO₂, deben considerarse a lo largo de toda la vida del edificio. Además de la energía de operación del edificio, se debe tener en cuenta la energía embebida. Ésta se define como la energía empleada en el edificio y los materiales de construcción durante todos los procesos de producción, construcción y demolición y vertido final.

Cuando se va a llevar a cabo una rehabilitación integral con el fin de mejorar la eficiencia energética del edificio, el uso del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) enfatiza que la energía embebida del edificio es un parámetro clave que debe ser considerado en la evaluación (Cellura et al., 2014). El ACV es un método sistemático que permite la cuantificación del potencial de los impactos ambientales de un edificio durante su ciclo de vida, desde la concepción de la estructura hasta su vida útil, y desde la extracción de materias primas hasta la gestión de los residuos de la demolición. La aplicación de esta metodología para evaluar las soluciones de rehabilitación ha crecido en los últimos años (Dodoo et al., 2010; Bin y Parker, 2012; Beccali et al., 2013; Cellura et al., 2013a).

2.2.2. Evaluación económica

Actualmente existen varias metodologías que permiten evaluar la eficiencia del coste de las inversiones de rehabilitación, como por ejemplo: el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR), la tasa de rendimiento global (TRG), la relación beneficio coste (RBC), el plazo de recuperación descontado y el plazo de recuperación (Kreith y Goswami, 2008; Krarti, 2011). En la evaluación económica de la mejora de la eficiencia energética del edificio, el VAN es el método más utilizado, dado que considera los flujos de caja futuros (Remer y Nieto, 1995). Asimismo, es el principal método de cálculo en el análisis del Coste de Ciclo de Vida (CCV), que se define como un método que permite el análisis comparativo de costes que se realizan en un periodo específico de tiempo, teniendo en cuenta todos los factores económicos relevantes, tanto en términos de costes de inversión como en costes futuros operacionales (ISO 15686-5, 2008).

La Tabla 2.3 presenta las investigaciones que evalúan la rehabilitación residencial desde la perspectiva económica. Se utilizan diversos métodos de coste-beneficio de acuerdo al objetivo del estudio. Gorgolewski (1995) describía un método de identificación de una estrategia óptima para la rehabilitación de una vivienda en un edificio de 12 plantas situado al oeste de Londres. El ahorro energético se calculó con el modelo BREDEM 8

(BRE, 1994). El procedimiento de CCV permitió ordenar las medidas en orden a medida que disminuía la relación coste-eficacia, indicando las medidas a las que había que dar prioridad. El análisis coste-beneficio se ha utilizado también para analizar la importancia de algunas medidas de ahorro energético (Amstalden et al., 2007; Goodacre et al., 2002; Papadopoulos et al., 2002). Gaterell y McEvoy (2005b) investigaron el impacto de la incertidumbre de los costes externos ambientales y sociales en el comportamiento relativo de una serie de medidas de aislamiento aplicadas retrospectivamente a una vivienda existente. Los costes sociales surgen cuando algún coste de producción o consumo se transmiten a terceras partes, como las futuras generaciones o la sociedad en general (Hohmeyer, 2002).

Tabla 2.3. Resumen de los trabajos de investigación seleccionados que evalúan con criterios económicos las medidas de eficiencia energética aplicadas en rehabilitación de viviendas. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Referencia	País	Indicadores	Medidas de eficiencia energética
Gorgolewski (1995)	Reino unido	SIR	Aislamiento Distintos vidrios Control de ventilación Distintas calderas <i>District heating</i>
Goodacre et al. (2002)	Reino unido	Análisis coste-beneficio	Mejora de la eficiencia de la calefacción y ACS
Papadopoulos (2002)	Grecia	VAN	Aislamiento de la envolvente Mejora de los sistemas de calefacción
Gaterell and McEvoy (2005b)	Reino unido	RBC	Aislamiento de cubierta Persianas aislantes Doble vidrio Aislamiento de cámara de aire
Amstalden et al. (2007)	Suiza	FCD (VAN+TIR+PR)	Aislamiento de la envolvente Sustitución de ventanas
Martinaitis et al. (2007)	Lituania	CCE	Aislamiento de cubierta y fachada Cambio de ventanas Mejora de las instalaciones
Hasan et al. (2008)	Finlandia	CCV(VAN)	Aislamiento de la envolvente Mejora de vidrios
Ouyang et al. (2011a)	China	CCV	Aislamiento de cubierta y fachada Persianas o cortinas móviles Sustitución de ventanas
Byman et al. (2012)	Suecia	VAN	Aislamiento de la envolvente Sustitución de ventanas y puertas Sellado Ventilación mecánica con recuperación de calor Mejora de los sistemas de calefacción
Desogus et al. (2013)	Italia	VAN	Aislamiento de cubierta y fachada Cambio de ventanas

SIR: ratio ahorro-inversión (*Savings-to-Investment Ratio*); VAN: Valor Actual Neto; RCB: Ratio Beneficio-Coste; FCD: Flujo de Caja Descontado; TIR: tasa interna de retorno; PR: Periodo de Retorno; CCE: Coste de Energía Conservada; CCV: Coste de Ciclo de Vida.

Hasan et al. (2008) analizaron la minimización del CCV en una vivienda unifamiliar, mediante la combinación de la simulación y la optimización. En la misma línea, Desogus et al. (2013) compararon la relación coste eficacia de dos escenarios de rehabilitación para la mejora térmica de un muro de edificios de mampostería de piedra situados en Cagliari, Italia. Byman and Jernelius (2012) evaluaron la rehabilitación de varios bloques multifamiliares en Suecia con el fin de aprender de casos de éxito. En todos los proyectos analizados, se consiguieron mejoras de eficiencia energética importantes, reduciendo el consumo energético por lo menos a la mitad. Sin embargo, encontraron que, dependiendo de los parámetros económicos definidos (tasa de interés, incremento del precio de la energía y vida útil), no siempre era rentable reducir a la mitad el uso de energía. Con el fin de abordar este tema, el proyecto IEA ECB Annex 56 (Ott et al., 2014), que está en desarrollo, tiene como objetivo desarrollar una nueva metodología para la rehabilitación rentable del parque existente, utilizando el equilibrio adecuado entre las medidas de ahorro y eficiencia energética por un lado, y las medidas y tecnologías que promueven el uso de energías renovables por el otro.

2.2.3. Evaluación multicriterio

Conscientes de la importancia de la sostenibilidad, se observa una fuerte tendencia en las investigaciones hacia una orientación a la optimización multicriterio. Generalmente, se incluyen los aspectos ambientales y económicos, mientras que los impactos sociales se tienen en cuenta en reducidas ocasiones (Tabla 2.4). Gero et al. (1983) fueron los primeros en proponer una metodología de evaluación multicriterio para ser aplicada en la fase de diseño del edificio y poder estudiar la relación entre el comportamiento térmico del edificio y otros criterios, tales como el coste de inversión y el área útil del edificio.

Recientemente, otros autores han aplicado también técnicas multicriterio para la evaluación de escenarios de rehabilitación (Alanne, 2004; Jaggs y Palmer, 2000; Rey, 2004). Verbeeck y Hens (2005) analizaron maneras económicamente viables para elegir entre medidas de aislamiento térmico, mejora de vidrios y sistemas de energía renovables como colectores solares o células fotovoltaicas. El impacto de estas medidas en el consumo energético y las emisiones de CO₂ se evaluaron mediante el inventario de ciclo de vida del consumo de energía primaria y las emisiones de CO₂ desde la perspectiva de la cuna a la tumba, mientras que el impacto económico se evaluó mediante el valor actual neto.

Tabla 2.4. Resumen de los trabajos de investigación de las metodologías para la evaluación multicriterio de las estrategias de rehabilitación en edificios residenciales. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Referencia	País	Criterios de evaluación		Medidas de eficiencia energética
		Ambiental	Ambiental	
Cohen et al. (1991)	EE.UU	Datos de medición	Costes instalación	Aislamiento de la envolvente Sustitución de ventanas Mejora de los sistemas de calefacción
Jaggs et al. (2000)	Grecia	Mejora de la calidad ambiental interior Optimización del consumo energético	Relación coste-eficacia	Aislamiento de cubierta y fachadas Sustitución de ventanas Sustitución de caldera Paneles solares
Al-Ragom (2003)	Kuwait	DOE-2.1E	Método de retorno simple	Aislamiento de cubierta y fachadas Sustitución de ventanas Disminución de superficie acristalada
Alanne (2004)	Finlandia	Valor ambiental	Coste de inversión	Funcionalidad Aislamiento de cubierta y fachadas Sustitución de ventanas VM con recuperación de calor Disminución temperaturas interiores Economizador en grifos
Mahlia et al. (2005)	Malasia	Cálculo de energía simple	Análisis coste-beneficio	Sustitución de lámparas incandescentes por fluorescentes
Verbeek y Hens (2005)	Bélgica	ACV (Energía primaria + emisiones CO ₂)	VAN	Aislamiento Mejora de vidrios Colectores solares y paneles PV
Diakaki et al. (2008, 2010)	Grecia	Consumo de energía primaria anual Emisiones CO ₂	Coste de inversión	Aislamiento de fachadas Sustitución de ventanas Mejora de instalaciones Colectores solares
Magnier y Haghighat (2010)	Canadá	Ahorros energéticos (ANN+TRNSYS)		Confort térmico Área de vidrios Orientación de ventanas Masa térmica Optimización HVAC
Nemry et al. (2010)	UE-25	ACV	VAN TIR	Sustitución de ventanas Aislamiento de cubierta y fachadas Nuevos sellados
Asadi et al. (2012b)	Portugal	Ahorros energéticos (TRNSYS)	Coste rehabilitación (GenOpt)	Aislamiento de cubierta y fachadas Sustitución de ventanas Colectores solares
Bojic et al. (2012)	Serbia	Ahorros energéticos (Energy Plus)	Coste inversión Retorno inversión	Aislamiento de cubierta y fachadas Nueva partición bajo cubierta
Dall'O et al. (2012a)	Italia	Ahorros energéticos	Coste inversión Ahorros anuales	Aislamiento de cubierta y fachadas Sustitución de ventanas Nuevos sellados
Häkkinen (2012)	UE-25	Simulación Huella de Carbono	CCV	Aislamiento de fachadas
Brown et al. (2013)	Suecia	Demanda energética MB	CCV	Aislamiento de cubierta, fachadas y cimentación Sustitución de ventanas Mejora de HVAC
Risholt et al. (2013)	Noruega	Demanda energética	CCV	Calidad de los hogares Aislamiento de fachadas Sustitución de ventanas
Vrijders y Wastiels (2013)	Bélgica	ACV	CCV	Aislamiento de cubierta y fachadas Sustitución de ventanas Mejora de calderas Paneles PV
De Angelis et al. (2013)	Italia	ACV	CCV	Aislamiento de cubierta y fachadas Sustitución de ventanas
Ostermeyer (2013)	Francia	ACV	CCV	Aislamiento de cubierta y fachadas Sustitución de ventanas Mejora de HVAC
Antipova et al. (2014)	Portugal	ACV	Coste (inversión+consumo energético)	Aislamiento de cubierta y fachadas Sustitución de ventanas Colectores solares
Cetiner y Edis (2014)	Turquía	ACV	CCV	Aislamiento de la envolvente Sustitución de ventanas

ACV: Análisis de Ciclo de Vida; CCV: Coste de Ciclo de Vida; TIR: tasa interna de retorno; MB: herramienta de certificación Sueca; PV: paneles fotovoltaicos; HVAC: instalaciones de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

En relación a la discusión de los enfoques metodológicos, algunos autores han analizado la aplicación de varios marcos de trabajo. Diakaki et al. (2008, 2010) estudiaron la viabilidad de la aplicación de técnicas de optimización multicriterio. El análisis económico lo realizaron mediante la aplicación del CCV. Los resultados verificaron la practicidad del enfoque, así como ilustraron los posibles problemas que pudieran surgir. Juan et al. (2009), por su parte, desarrollaron un sistema para la toma de decisiones basado en un algoritmo genérico (GA) para evaluar la rehabilitación de viviendas, sugiriendo las estrategias óptimas, considerando una relación de coste y calidad.

Magnier y Haghighat (2010) aplicaron el enfoque GAINN para la optimización del confort térmico y el consumo energético en una vivienda unifamiliar. Este enfoque utiliza primero una red neuronal artificial (ANN) para caracterizar el comportamiento del edificio y, posteriormente, combina este ANN con un Algoritmo Genérico multicriterio (NSGA-II) para la optimización. Chantrelle et al. (2011) desarrollaron una nueva herramienta, MultiOpt, para la optimización multicriterio de las soluciones de rehabilitación, con respecto a las envolventes, los sistemas de calefacción, ventilación a aire acondicionado (HVAC) y las estrategias de control. Esta herramienta se basó en el método de optimización NSGA-II considerando cuatro criterios: consumo energético, coste, impacto ambiental de ciclo de vida y confort térmico.

Por otro lado, Asadi et al. (2012a) propusieron también un modelo de optimización multicriterio para ayudar a los inversores en la definición de las medidas que permitieran minimizar la energía de uso del edificio de manera eficiente, con el fin de optimizar el coste de rehabilitación, el ahorro energético y el confort térmico de los edificios residenciales en Portugal.

Bojic et al. (2012) estudiaron las posibilidades de reducir el consumo energético de una antigua casa sin aislamiento en Belgrado, Serbia. Utilizaron el programa de simulación energética EnergyPlus para calcular el consumo energético de la vivienda sin rehabilitar y con distintos escenarios de rehabilitación. Los resultados obtenidos se analizaron en términos de ahorro energético, inversión y el rendimiento de inversión.

Brown et al. (2013) propusieron un método para evaluar paquetes de rehabilitación diseñados con el objetivo de mejorar la eficiencia energética. El método incluía el cálculo de la demanda energética, CCV y evaluación del edificio de acuerdo a la herramienta de certificación ambiental de Suecia (Malmqvist et al., 2011).

Risholt et al. (2013) evaluaron la sostenibilidad de dos estrategias de rehabilitación de consumo casi nulo en una vivienda unifamiliar en Noruega. Proponían un método

iterativo para el análisis de sostenibilidad, incluyendo el comportamiento energético y técnico tras la rehabilitación, el CCV y las preferencias del propietario.

Vrijders y Wastiels (2013) analizaron la rehabilitación de un edificio en Bélgica, considerando distintos escenarios mediante las metodologías de ACV y CCV. En este caso, la rentabilidad económica y los impactos ambientales se comparaban de forma separada.

En el norte de Italia, De Angelis et al. (2013) estudiaron varias alternativas de rehabilitación para un bloque de viviendas, definiendo un método basado en ACV y CCV.

Con un mayor alcance, Ostermeyer et al. (2013) propusieron un método de optimización de Pareto multidimensional usando el ACV y CCV. De acuerdo al principio de Pareto, las opciones de una población de alternativas consideradas son óptimas (no predominantes) si no hay otra opción que mejore un objetivo sin empeorar automáticamente al menos otro objetivo (Marler y Arora, 2004). Este método se utilizó para analizar un caso de estudio de un proyecto europeo denominado “BEEM-UP”, en el se desarrollaron soluciones de rehabilitación para adoptar a gran escala. Cetiner y Edis (2014) definieron un método de evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica para evaluar la eficacia de la rehabilitación del parque residencial. El método propuesto estaba basado en el método de ACV, y evaluaba la sostenibilidad ambiental y económica de la rehabilitación de la envolvente.

2.3. El Enfoque de Ciclo de Vida en la rehabilitación de viviendas

2.3.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se desarrolló en la década de los 70 para evaluar productos industriales. Su primera aplicación en el sector de la construcción estaba limitada al análisis de aspectos energéticos (Kohler, 1986). En las últimas décadas, a nivel internacional y específicamente en el contexto europeo, se ha consolidado como la metodología de referencia para evaluar el impacto ambiental (Beccali et al., 2013).

En el sector de la construcción, algunos estudios de ACV se centran en los materiales (p. ej. Nicoletti et al., 2002; Bolin y Smith, 2011; Audenaert et al., 2012) o evalúan únicamente la fase de construcción del edificio (González y Navarro, 2006; Asif et al., 2007; Zabalza Bribián et al., 2011). Sin embargo, el ACV de un edificio es una tarea compleja debido a diversos factores, incluyendo la larga vida útil (a menudo más de 50 años), el número de actores involucrados y la singularidad de cada edificio.

La relación de la energía embebida de los materiales utilizados y la energía consumida durante la vida útil del edificio ha sido objeto de estudio en los últimos años (Gustavsson et al., 2010; Hernandez y Kenny, 2011; Stephan et al., 2012; Yung et al., 2013). Los resultados demuestran que la mayoría de la energía y los impactos de carbono en el ciclo de vida se acumulan en la fase de uso (Gustavsson y Joelsson, 2010; Russell-Smith et al., 2015). Keoleian et al. (2000) hallaron una amplia distribución de los efectos acumulados en todas las fases del ciclo de vida de un edificio residencial, emergiendo la mayoría de la fase de uso.

Sartori y Hetnes (2007) encontraron en su revisión bibliográfica que existe una gran correlación entre la energía consumida durante todo el ciclo de vida y el consumo energético durante la fase de uso. Sin embargo, cuando se mejora la eficiencia energética de un edificio debido a la implementación de medidas de rehabilitación, se reduce el consumo energético durante la fase de uso y se añaden materiales y componentes al edificio, aumentando la energía embebida (Chen et al., 2001). Esto hace que el consumo energético durante la fase de uso sea comparable al de otras fases (Ardente et al., 2011). Cellura et al. (2013b) demostraron que al evaluar los beneficios energéticos y ambientales procedentes de la implementación de una política o acción, es necesario calcular, para que los resultados no sean erróneos, no sólo de los ahorros energéticos debido a la aplicación dicha medida, sino que también el consumo energético indirecto de su implementación. En esta línea, el proyecto IEA EBC Annex 57

(2014), está intentando desarrollar unas directrices para la evaluación y reducción de la energía embebida y las emisiones de CO₂ resultantes de la construcción del edificio.

Por otro lado, el ACV se ha utilizado para realizar estudios de optimización. Sin embargo, hay parámetros relevantes que en algunos casos no se especifican. En este sentido, se ha observado que las hipótesis relativas al comportamiento de los ocupantes (como por ejemplo la temperatura de consigna del termostato, el consumo de agua, etc.) generalmente no se describen. Cabe destacar que esto está directamente relacionado con el consumo energético del edificio (Guerra Santin et al., 2009; Guerra-Santin e Itard, 2010; Mullaly, 1998; Owens y Wilhite, 1988; Seligman et al., 1978; Steg, 2008). Algunos estudios revelan que el comportamiento del usuario puede ser tan variable que provoque oscilaciones en el consumo energético que llegan a alcanzar un factor de variabilidad de dos o más (Baker y Steemers, 2000; Steemers y Yun, 2009). Galvin et al. (2013) observaron que, mientras el ahorro teórico conseguido en Alemania estaba en torno a un 33%, el ahorro real tras la rehabilitación fue finalmente del 25%. Dada la relevancia del comportamiento del usuario en el consumo energético, Peuportier et al. (2013) desarrollaron una metodología que incorpora un análisis de sensibilidad sobre la influencia de los ocupantes en el uso de energía, junto con otros aspectos ambientales.

2.3.2. Análisis del Coste de Ciclo de Vida (CCV)

El CCV tiene su origen a mediados de la década de los 60 en el Departamento de Defensa de EE.UU. (Epstein, 1996). A mediados de los 80, se adaptó la metodología para aplicarla en inversiones inmobiliarias (Bennett y Norman, 1987). Recientemente, se han desarrollado numerosos estudios, con el objetivo de hallar soluciones óptimas para la rehabilitación de viviendas, utilizando el CCV para dar una indicación de los beneficios económicos a lo largo de la vida de las medidas (Amstalden et al., 2007; Brown et al., 2013; Cetiner y Edis, 2014; Desogus et al., 2013; Gorgolewski, 1995; Hasan et al., 2008; Ostermeyer et al., 2013; Papadopoulos et al., 2002; Risholt et al., 2013; Verbeeck y Hens, 2005; Vrijders y Wastiels, 2013).

El ayuntamiento de Växjö (Suecia) calculó los costes del ciclo de vida como base para la selección de las medidas de eficiencia energética de sus edificios. Para ello, se desarrolló el modelo “Belok LCC”, una herramienta para el cálculo energético y económico que permite evaluar inversiones alternativas (Gustavsson, 2012). El enfoque adoptado por Amstalden et al. (2007) se basa en la lógica de que las intervenciones óptimas económicamente minimizan los gastos de construcción y uso (consumos energéticos debido al acondicionamiento de los espacios) durante la vida del edificio.

Esta metodología se ha utilizado también para identificar oportunidades de mejora del parque residencial existente (Cuéllar-Franca y Azapagic, 2013; Morrissey y Horne, 2011; Nemry et al., 2010). Así, Cuéllar-Franca y Azapagic (2013) descubrieron tras el análisis del parque residencial de Reino Unido que la fase de uso era responsable de la mayoría de los costes (52%), fundamentalmente debido al uso de energía. La fase de construcción contribuía en un 35%, mientras que la fase de fin de vida era responsable del 13% de los costes totales. Por lo tanto, la fase de uso y la de construcción se identificaron como aquellas a las que debían dirigirse para reducir los costes de ciclo de vida de las viviendas. A modo de ejemplo, mejorar la eficiencia energética de las viviendas mediante la mejora del aislamiento y el uso de aparatos y luminarias de mayor eficiencia energética, no sólo reduciría las facturas energéticas sino que también los impactos ambientales, dado que la fase de uso era también un punto de conflicto para la mayoría de las categorías de impacto.

Es un hecho aceptado que la vida útil del edificio considerada para un CCV puede alterar significativamente los resultados económicos y ambientales (Aktas y Bilec, 2012; Mequignon et al., 2013). Generalmente, cuanto mayor es la vida del edificio, los beneficios económicos son mayores (Moore y Morrissey, 2014). Sin embargo, no existe ninguna norma universal o referencia metodológica que permita definir cuál debe ser la vida útil de un edificio. En España, la orden ECO/805/2003 (Ministerio de Economía, 2003) establece la vida útil para edificios residenciales en 100 años. Dado que la vida útil de un edificio representa un periodo de tiempo largo (de 30 a 100 años, o más), el calendario de los flujos de costes y beneficios es importante. Una técnica muy común que refleja esto es el uso de la actualización. El valor temporal del dinero, expresado como tasa de descuento, depende de la inflación, el coste de capital, las oportunidades de inversión y las preferencias personales de consumo (Pike y Dobbins, 1986; Perkins, 1994; Kirk y Dell'Isola, 1995). La selección de una tasa de descuento apropiada se pone habitualmente en tela de juicio cuando se lleva a cabo un análisis de coste de ciclo de vida en viviendas y, más ampliamente, en la evaluación del coste-beneficio ambiental (Moore and Morrissey, 2014). Hasan et al. (2008) hallaron, mediante un análisis de sensibilidad, que la clasificación de las mejores soluciones constructivas que ellos establecían eran válidas para un interés real máximo del 4%. En el caso de un interés real mayor, la mejor solución que había sido seleccionada ya no resultaba viable.

2.3.3. Optimización ambiental y económica

La toma de decisiones ambiental y económica es un asunto de creciente importancia en la evaluación de soluciones de rehabilitación. Tal y como se ha visto, existen muchas experiencias en el ámbito de la investigación que han mostrado que el ACV y el CCV son instrumentos prometedores para el cálculo de los respectivos efectos (Bierer et al., 2015;

Optis y Wild, 2010). Sin embargo, se han desarrollado de manera independiente, y por lo tanto, existen algunas diferencias en terminología, marco de trabajo y reglas de cálculo.

Como se ha observado, la evaluación multicriterio mediante la perspectiva del ciclo de vida todavía no está muy desarrollada a nivel de rehabilitación. Por eso, en este apartado se hace una revisión cronológica de las metodologías multicriterio empleadas en construcción y que incorporan el Enfoque de Ciclo de Vida, tanto en los impactos ambientales como en los económicos.

Obërg (2005) en su tesis doctoral desarrolla una herramienta simplificada que integra el ciclo de vida en la fase de diseño para edificios residenciales. Esta herramienta contiene una serie de criterios de diseño que abordan los rasgos fundamentales, módulos para el coste de ciclo de vida, cálculo del balance energético, pre-diseño estructural y acústico, y análisis ambiental de retorno. La optimización multicriterio se realiza con MADA (*Multiple Attribute Decision Analysis*), que es un proceso analítico que permite obtener el grado de conveniencia en un único valor para alternativas con diversos factores analizados cuantitativa y cualitativamente. El objetivo es promover viviendas multifamiliares económicamente eficientes. Por ello, se asigna un ranking de importancia y se establece un criterio de ponderación para los distintos aspectos evaluados: 40% economía, 20% ambiente interior, 20% calidad funcional, 20% ecología y uso de recursos. Los impactos ambientales son reducidos a un único valor mediante el sistema de ponderación EPS. Esta ponderación asigna el coste económico por kg de emisiones de CO₂, NO_x y SO₂, así como el coste económico de la energía utilizada.

Allacker (2007) propone una metodología para evaluar el impacto ambiental y los costes financieros en edificios residenciales, incluyendo el ciclo de vida completo del edificio. Para ello, combina el ACV y el CCV, llegando a un impacto ambiental y coste económico total por m² de superficie útil. Para posibilitar un análisis comparativo, se añade un paso final: se realiza una evaluación de calidad mediante un análisis multicriterio. El ACV se realiza siguiendo la normativa ISO 14040. La evaluación de impacto se realiza mediante el eco-indicator 99, considerando el daño a la salud humana (HH), la calidad de los ecosistemas (QE) y el agotamiento de recursos (R) (www.pre.nl/eco-indicator99). Los resultados se normalizan dividiendo los resultados por el impacto anual de un ciudadano europeo medio. Para la ponderación se asume que HH es igual de importante que QE y que R es la mitad de importante (40%, 40% y 20% respectivamente). La puntuación única se presenta en eco-puntos. Para estudiar el CCV se calcula el valor actual neto.

Posteriormente, Allacker (2010, 2012) en su tesis doctoral y en publicaciones posteriores, muestra cómo relacionar el ACV y CCV, para poder optimizar los distintos sistemas constructivos en edificios residenciales. Primero, realiza el ACV considerando

los impactos citados anteriormente, así como emisiones aéreas, impactos en la salud humana y cultivos ($PM_{2.5}$, SO_2 , NO_x , NH_3 , VOC), gases de efecto invernadero (CO_2 equivalentes) y agua. Se llega a una puntuación única mediante ponderación y los impactos se expresan en valores monetarios, denominándolos costes externos. Los valores monetarios se asignan mediante el enfoque WTP (*willingness to pay*) que determina cuánto está dispuesta a pagar la sociedad para reducir los impactos ambientales. Finalmente, analizan mediante el sistema de optimización de Pareto, las soluciones óptimas según la relación del coste de inversión y coste de ciclo de vida. Esta metodología ha sido plasmada en la herramienta SuFiQuaD-tool.

Anastaselos (2009) propone una herramienta para la evaluación energética, económica y ambiental de soluciones de aislamiento térmico en Grecia. Los resultados energéticos, ambientales y económicos se presentan en una escala desde la A la C. La herramienta se aplica en una fachada con cámara de aire a la que se añade un sistema de aislamiento térmico por el exterior (SATE) tanto para nueva edificación como para rehabilitación. En una publicación posterior (Anastaselos et al., 2011), presentan un nuevo modelo de apoyo para la toma de decisiones para la evaluación integral de las soluciones de aislamiento térmico. El sistema comprende el consumo de energía primaria, impacto ambiental y coste financiero. Cada uno de ello se evalúa para las cuatro fases del ciclo de vida del material, y se realiza mediante algoritmos matemáticos.

En esta misma línea, Dylewski y Adamczyk (2012) estudian los indicadores ambientales y económicos para la inversión en aislamiento térmico en edificios. Los indicadores ambientales analizados son el valor actual neto ecológico, indicador ecológico de rentabilidad y el periodo de retorno ambiental. Estos impactos se analizan con el ACV con el software SimaPro junto con el procedimiento eco-indicador 99. Los resultados se presentan con una ponderación final en eco-puntos. En cuanto a los indicadores económicos, se estudian el valor actual neto, el indicador de rentabilidad y el periodo de retorno, mediante la metodología de CCV.

Ristimäki et al. (2013) combinan el ACV y CCV para el análisis de sistemas centralizados de suministro de energía en edificios residenciales de nueva planta. Los resultados económicos se presentan mediante el valor actual neto en €/m²/año. Los ambientales, como en investigaciones anteriores, se presentan en puntuaciones únicas, pero en este caso se consideran las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en toneladas. Los resultados se recogen en una gráfica que relaciona los resultados económicos y ambientales durante la vida útil considerada.

Vrijders y Wastiels (2013) evalúan la rehabilitación de viviendas para llegar a edificios de consumo casi cero mediante el análisis de ciclo de vida y el coste de ciclo de vida. Sin embargo, no relacionan los datos para obtener las soluciones óptimas.

De Angelis et al. (2013) proponen una optimización energética de las estrategias de rehabilitación basada en el ACV y CCV. Finalmente se comparan las emisiones de CO₂ equivalentes (GWP), el consumo de energía acumulado (CED) y los costes por m² de vivienda.

Ostemeyer et al. (2013) proponen una metodología de optimización multidimensional mediante el sistema de optimización de Pareto, combinando el ACV y CCV, para la evaluación de soluciones de rehabilitación. Comparan tres escenarios, el primero rehabilitando sin mejorar la eficiencia energética, el segundo incluyendo aislamiento térmico en la envolvente y mejorando las instalaciones de calefacción y ventilación, y el tercero mejorando, aún más, estos elementos. Se calcula, por un lado, el CCV por m² de superficie que incluye los costes de inversión y los flujos de caja del ciclo de vida. Por otro lado, en el ACV se consideran los siguientes indicadores: indicadores de la metodología ReCiPe H/A, IPPC 100 y CED. Finalmente la optimización se realiza mediante el método de Pareto comparando el indicador económico CCV y el indicador ecológico ReCiPe.

Cetiner y Edis (2014) analizan la rehabilitación de las viviendas mediante la incorporación de aislamiento en fachadas, suelos, cubierta y cimentación, además de cambio de vidrios. Comparan el impacto ambiental y económico del edificio sin rehabilitar con la aplicación de distintas medidas de rehabilitación. El grado de sostenibilidad total se calcula con la siguiente fórmula:

$$SP_{i,j} = ((NR_{i,j} \times mn) + (CR_{i,j} \times mc)) / 100$$

Donde, *NR* es el impacto ambiental y *CR* es el impacto económico. Los valores de *mn* y *mc* se asignan según la importancia de los aspectos ambientales y económicos respectivamente y su suma debe ser igual a 100.

El proyecto CILECCTA (*A user-oriented, knowledge-based suite of Construction Industry Life Cycle Cost Analysis software for pan-European determination and costing of sustainable Project options*), proyecto cofinanciado por la Comisión Europea bajo el 7º Programa Marco, tenía como objetivo desarrollar una herramienta informática que permitiera analizar el coste del ciclo de vida para poder alcanzar construcciones sostenibles, tanto energética como económicamente. Para ello, en el proyecto se plantea una metodología que aplica de una forma combinada las metodologías ACV y CCV a los diferentes diseños, apoyándose en bancos de precios e inventarios estándar, para obtener valoraciones económicas y energéticas que permitan expandir los horizontes de una forma cuantificable.

2.4. La rehabilitación a nivel nacional

La rehabilitación de viviendas en España se ha llevado a cabo durante años atendiendo casi exclusivamente a su consolidación estructural, a la corrección de patologías, y a la incorporación o actualización de las instalaciones. El objetivo es mantener los edificios en condiciones de uso y cumplimiento de las normativas vigentes, aplicándose criterios de suficiencia técnica y coste mínimos. Y, generalmente, se ha desaprovechado la ocasión de incorporar mejoras ambientales (Prat y Wadel, 2010).

Sin embargo, la preocupación por el comportamiento ambiental urbano, unida a la coyuntura económica actual, ha puesto en el punto de mira los barrios periféricos de las ciudades españolas. Desde hace varios años, diversos municipios han puesto en marcha programas pioneros y las administraciones públicas han empezado a desarrollar ayudas para el fomento de la rehabilitación de estos barrios.

2.4.1. Iniciativas de rehabilitación de vivienda social

A nivel nacional son varios los proyectos que han desarrollado diversas instituciones públicas para rehabilitar el parque social construido. Como denominador común se encuentra la época de construcción del parque residencial en el que se actúa, ya que se centran en el parque edificado entre 1940 y 1980.

En la presente investigación se va a evaluar si las estrategias de rehabilitación actuales son adecuadas al incorporar en su evaluación el Enfoque de Ciclo de Vida ambiental y económico. Para ello, y si bien en la definición de los casos de estudio se realizará un análisis exhaustivo de las soluciones habituales de rehabilitación, se cree conveniente realizar un recorrido por las iniciativas de rehabilitación públicas, así como las políticas de promoción de la rehabilitación privada durante los últimos años, con el fin de identificar el panorama de la rehabilitación residencial a nivel nacional.

ADIGSA, la empresa pública del Departamento de Medio Ambiente y Vivienda que administra y gestiona las viviendas sociales públicas de la Generalitat de Cataluña, heredó en 1985 la gestión de 60.000 viviendas (Rubio del Val, 2008). Desde 2002 ha participado en diversos proyectos internacionales relacionados con la rehabilitación del parque inmobiliario, entre los que destaca su participación en el proyecto “REVITASUD” (ADIGSA, 2006) desarrollado entre los años 2003 y 2007 junto a otros 3 socios, 2 de ellos nacionales (Sociedad Municipal de Rehabilitación Urbana de Zaragoza del Ayuntamiento de Zaragoza y la Agencia de Renovación Urbana del Ayuntamiento de

Vitoria-Gasteiz). El proyecto consistía en elaboración de propuestas piloto de revitalización urbana en barrios residenciales transfronterizos (1945-1960).

El proyecto “RehViSES- Rehabilitaciones energéticamente sostenibles en barrios sociales”, finalizado en 2006 y desarrollado dentro del 5º Programa Marco de la Unión Europea, se centró en soluciones arquitectónicas que incorporasen energías renovables y/o medidas pasivas. Para ello se intervino en el Barrio del Pomar (Barcelona), compuesto por 2.000 viviendas y 7.000 habitantes, transformándolo en un barrio energéticamente sostenible mediante la sustitución de cubiertas de fibrocemento existentes por otras que incorporasen paneles fotovoltaicos y paneles solares térmicos, la incorporación de aislamientos en fachadas, la reutilización del agua de lluvia, ajardinamientos con flora autóctona, iluminación de bajo consumo, sistemas de sombreado, etc.

El proyecto “RESHAPE- *Retrofitting Social Housing and Active Preparation for EPBD*”, desarrollado en el periodo 2006-2008 y financiado por la Comisión Europea a través de la convocatoria *Intelligent Energy Europe* (IEE), ha contado con la participación de diez socios internacionales de Holanda, Bélgica, Estonia, Bulgaria, República Checa y España. En este proyecto ADIGSA pretendía adelantarse a la transposición de la Directiva Europea y, mediante la certificación de un grupo de edificios de referencia, conocer la eficiencia energética del parque de viviendas que gestionaba y evaluar la comunicación de esta información a sus propietarios y arrendatarios. Al mismo tiempo, se recogió información sobre buenas prácticas en rehabilitación y mejora de la eficiencia energética en el ámbito del nacional. Las estrategias propuestas para la rehabilitación de viviendas en el caso de España eran el aislamiento de fachadas y cubiertas, mejora de carpinterías y uso de vidrios dobles, instalación de paneles solares térmicos y fotovoltaicos. Finalmente, no se aplicaron energías renovables en el proyecto porque se requería una fuerte inversión. Sin embargo, sí que mejoraron los sistemas de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS). Una barrera encontrada, que suele estar muy presente en los proyectos de rehabilitación, es que los vecinos no podían dejar sus viviendas mientras se sucediesen las obras. Por tanto, el aislamiento se realizó por el exterior. Se evaluaron nueve escenarios distintos y los ahorros oscilaron entre un 11% y un 40% (Wallyn et al., 2008).

La Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo de Madrid (EMVS), por su parte, también ha llevado a cabo números proyectos de rehabilitación. Un ejemplo reseñable es el de San Cristóbal de los Ángeles, que en 1999 se declaró como Área de Rehabilitación Integral (ARI), con la participación del Ministerio de Fomento, la Comunidad y el Ayuntamiento. La transformación de este barrio partió de un diagnóstico efectuado sobre la situación arquitectónica, urbanística y social del mismo. Se trata de un barrio de

vivienda protegida del distrito de Villaverde, nacido en los años 60 con la denominación de Poblado Dirigido, que cuenta con 5.839 viviendas y una población de más de 16.000 vecinos (Arroyo Castillo, 2010). El barrio presentaba una problemática arquitectónica y social común: edificios con importantes déficits constructivos y estructurales y carencia de ascensores en los inmuebles de bloque abierto, a lo que se sumaba un progresivo envejecimiento demográfico, con notables dificultades para abordar el proceso rehabilitador. Las acciones llevadas a cabo han sido la consolidación estructural, aislamiento de fachadas y cubiertas, cambio de carpinterías y vidrios y la instalación de ascensores para solucionar los problemas de accesibilidad (Pérez Quintana, 2007, p. 66).

La Asociación de Investigación Industrial de Andalucía (Sevilla), por su parte, ha desarrollado el proyecto “E-RETROFIT KIT”. Se trata de una herramienta que introduce conceptos Passivhaus en la rehabilitación. Ha sido desarrollado por un consorcio en el que participan equipos de Austria, Dinamarca, Lituania, España y Holanda y se ha traducido a diez idiomas cubriendo trece países. La herramienta, que está disponible online¹, contiene una caracterización del parque edificado de cada país (tipologías más representativas, sistemas constructivos, consumo estimado de calefacción) y un menú de medidas de rehabilitación adecuadas para cada tipología, mostrando el ahorro energético estimado, los costes de inversión asociados y el *payback* económico. En el caso de España, se han considerado nueve tipologías entre los años 1960 y 1980, con una matriz de tres periodos de tiempo (anteriores a 1960, 1960-1979, posteriores a 1979) y tres tipos de edificios (bloque de más de 4 plantas, bloque de 4 plantas o menos y vivienda adosada). En cuanto a las medidas de rehabilitación se propone aislamiento por el exterior, aislamiento de cubiertas, vidrios dobles bajo emisivos, captadores solares para ACS y sustitución de las calderas de calefacción y ACS por calderas de alto rendimiento. En cuanto a la protección solar se proponen elementos de bloqueo de la radiación solar, es decir, toldos que permitan una corrección del factor solar en verano de 0,25 y ventilación nocturna, proponiendo más de 4 ren/h durante las noches de verano. En la herramienta se presentan dos proyectos piloto desarrollados por ADIGSA (ADIGSA, 2003b, 2003a). Cabe destacar que los periodos de retorno estimados oscilan entre 25 y 50 años.

La Sociedad Municipal de Rehabilitación Urbana de Zaragoza (SMRUZ), actualmente Sociedad Municipal Zaragoza Vivienda, lleva más de una década inmersa en proyectos de rehabilitación de vivienda social. Además de desarrollar en la ciudad el proyecto “REVITASUD” comentado anteriormente, en 2004 desarrolló la rehabilitación de 21

¹ <http://www.energieinstitut.at/retrofit/>

conjuntos urbanos de interés, que albergaron en torno a 8.000 viviendas construidas durante el período 1945-1965, con el concurso de prestigiosos técnicos locales y nacionales, mediante la realización de los “Estudios y Propuestas para la rehabilitación de 21 Conjuntos Urbanos de Interés”. Su objetivo fue poder disponer de una radiografía social y física de todo este patrimonio edificado con el fin de diseñar con adecuada información y fundamento conceptual las políticas de rehabilitación acordes con cada situación (Ruiz Palomeque y Rubio del Val, 2006). El estudio contiene una metodología rigurosa que incluye una clasificación sistemática de los edificios elaborando una base de datos con soluciones tipo, un diagnóstico englobando tres niveles (edificación, urbanismo y social), una serie de propuestas de actuación, modelos de gestión y un estudio económico. En cuanto a las medidas de rehabilitación, proponen una serie de medidas para solucionar los problemas de funcionalidad y habitabilidad (Ruiz Palomeque y Rubio del Val, 2006).

Adicionalmente, el ayuntamiento de Zaragoza desarrolló entre los años 2005 y 2010, junto con la Ciudad de Lyon y la Región de Lombardia, el proyecto “RENAISSANCE” incluido en el Programa *Concerto* de la Unión Europea, cuyo objetivo era el ahorro energético en Europa. En el caso de Zaragoza, el proyecto consistió en la rehabilitación de un conjunto urbano de 360 viviendas, situadas en el barrio Picarral. Este barrio, situado en la margen izquierda del río Ebro, necesitaba recuperar y revitalizar las viviendas construidas entre los años 1945 y 1960. La rehabilitación se centró en tres aspectos: realizar un análisis de los edificios antes y después del proceso; impartir formación, tanto al personal técnico que participa en la intervención como a los usuarios de las viviendas rehabilitadas, sobre las medidas a adoptar para lograr el mayor ahorro de energía; y por último, rehabilitar los bloques de viviendas, mejorando el aislamiento de cubiertas y fachadas, sustituyendo bajantes y carpinterías, instalando ascensores e introduciendo energías renovables: instalación de paneles solares (producción de agua caliente sanitaria) y placas fotovoltaicas (producción de energía eléctrica).

2.4.2. Políticas de fomento a la rehabilitación privada

Asimismo, en los últimos años se han desarrollado diversas políticas de fomento a la rehabilitación privada. Este tipo de estrategias, impulsadas por los sucesivos planes estatales de vivienda y por los planes autonómicos con similares objetivos, pueden caracterizarse por los siguientes rasgos (Rubio del Val y Costa, 2010):

- Por lo general, se centran exclusivamente en el estímulo y fomento de la rehabilitación residencial y, eventualmente, en la reurbanización de los espacios próximos a los edificios.
- Se dirigen a los propietarios o usufructuarios privados de los inmuebles o a los inquilinos de los mismos, con autorización de los propietarios.

- Adoptan formas de subvenciones económicas, desgravaciones fiscales, créditos subsidiados, etc.
- Las ayudas se han organizado en tres grandes apartados: Áreas de Rehabilitación Integrada (en adelante, ARI), Áreas de Renovación Urbana (en adelante, ARU) y las dirigidas a la rehabilitación aislada.
- En los últimos tiempos se están concediendo mayores ayudas a determinados tipos de obras de rehabilitación aislada, esto es, edificio a edificio: mejora de las condiciones de accesibilidad, reducción del consumo energético, garantía de seguridad estructural y estanquidad, etc.

Sin embargo, todavía la actividad de rehabilitación es muy baja. El Grupo de Trabajo para la Rehabilitación (GTR) considera que 10 millones de viviendas principales construidas en España antes de 2001 pueden y deben ser transformadas en viviendas de bajo consumo y de baja emisión de gases de efecto invernadero. Según los resultados de su estudio, “España puede alcanzar en 2050 los 10 millones de viviendas rehabilitadas energéticamente—el 64% más ineficiente del parque de viviendas principales anterior a 2001— reduciendo su consumo de calefacción en un 82% y sus demandas de energía comercial para el agua caliente sanitaria en un 60%.” Para ello, el GTR propone una hoja de ruta en la que plantea que una inversión en la mejora de la eficiencia energética de los edificios existentes españoles no sólo va a permitir el cumplimiento de los compromisos de mejora de la eficiencia energética, de reducción de nuestra dependencia energética del exterior y de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que va a tener un impacto positivo directo a nivel macro-económico, puesto que actuará como un estímulo importante del empleo y la actividad, aumentando los ingresos fiscales y reduciendo los costes del desempleo (Cuchí y Sweatman, 2011b).

El potencial que tiene la rehabilitación del parque de viviendas existente, en términos de contribución al ahorro de emisiones de CO₂, es muy elevado y se presenta como una de las estrategias más eficaces para contribuir a frenar el cambio climático, colaborando además en la mejora de la calidad de vida de sus usuarios. A continuación, se exponen algunos datos que permiten evidenciar el enorme potencial que tiene en España la rehabilitación de este tipo de edificios con el fin de contribuir al ahorro energético (Rubio del Val y Costa, 2010):

- El ahorro medio en cada vivienda rehabilitada de 80 m² sería de 1,12 T CO₂/año.
- Si se rehabilitaran sólo el 50 % de las viviendas principales de más de 35 años existentes en España, se ahorrarían casi 3.100.000 T de emisiones de CO₂ a la atmósfera cada año.

- Ello equivaldría a las emisiones producidas por tres millones de coches que hiciesen unos 6.000 Km al año (es decir, las de todos los coches que hay en Dinamarca).

Por otro lado, Prat et al. (2010) realizan un estudio sobre diferentes acciones de rehabilitación llevadas a cabo en Zaragoza, Madrid y Cataluña, que pretende poner en relieve y hacer tomar conciencia a los agentes implicados en las obras de rehabilitación, del amplio margen de mejora ambiental que todavía queda por aprovechar en este campo. Las pocas actuaciones en las que se atiende a mejoras energéticas, se reducen a mejorar la eficiencia energética de los edificios en su fase de uso, que se suelen concretar en aislamiento de la envolvente, cambio de carpinterías y la incorporación de sistemas de captación de energía solar térmica. Los demás aspectos, como la energía invertida en las demás fases, la gestión del agua, el impacto de los materiales que se usan en obra y la gestión de residuos generados, no se tienen en cuenta en casi ninguna ocasión.

En el año 2012, el grupo de trabajo GTR desarrolló un catálogo de actuaciones para rehabilitaciones energéticas en el que proporcionaban información relativa al coste económico, el coste energético, el coste de emisiones y el ahorro de energía y/o emisiones (Cuchí y Sweatman, 2012c).

2.5. Marco normativo

La normativa en relación a la edificación ha evolucionado a lo largo de los años, haciendo cada vez mayor hincapié en la mejora del comportamiento térmico de los edificios. Antes de analizar el marco normativo a nivel europeo y nacional, es preciso hacer un repaso histórico de la legislación aplicada en el parque existente nacional, con el fin de poder establecer las exigencias constructivas impuestas en cada periodo.

2.5.1. Evolución histórica del marco normativo en España

1957: Normas MV competencia del Ministerio de la Vivienda. Desarrollada por la Dirección General de Arquitectura del Ministerio de Gobernación (institución creada en 1937). En estas normas no existía ninguna regulación térmica que obligara a las figuras de la edificación (técnicos, promotores o constructores) a incorporar aislamientos térmicos en el diseño.

1975: Decreto 1490/1975, de 12 de junio, por el que se establecen medidas a adoptar en las edificaciones con objeto de reducir el consumo de energía. Si bien ya se había constituido una Comisión para la redacción de una Norma Básica de Aislamiento Térmico de la Edificación, este Decreto se aprobó con el objeto de adelantar, en lo posible, la adopción de medidas para reducir el consumo de energía destinada a calefacción de la nueva edificación.

1977: NBE Normas Básicas de la Edificación. El Gobierno decidió crear un marco unificado para toda la normativa relacionada con la edificación. Su aplicación era de obligado cumplimiento para los agentes del sector. A las NBE se le añadieron las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE) para completar el marco regulatorio. Estas especificaciones no tenían carácter obligatorio y servían como el desarrollo operativo de las NBE.

1979: NBE-CTE 79 Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas en los Edificios. Esta normativa se aprobó mediante el Real Decreto 2429, regulando las exigencias térmicas mínimas que debían cumplir los edificios de nueva construcción. Entre los años 1975 y 1980 el sector de la construcción de viviendas entró en crisis a consecuencia del fuerte encarecimiento. La actividad se ralentizó y la demanda sufrió una importante caída.

1999: Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación en la Edificación. Tiene como principal objetivo “regular en sus aspectos esenciales el proceso de la edificación,

estableciendo las obligaciones y responsabilidades de los agentes que intervienen en dicho proceso, así como las garantías necesarias para el adecuado desarrollo del mismo, con el fin de asegurar la calidad mediante el cumplimiento de los requisitos básicos de los edificios y la adecuada protección de los intereses de los usuarios”. Además, insta y autoriza al Gobierno para la aprobación de un Código Técnico de la Edificación mediante Real Decreto que establezca las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad. La Ley de Ordenación de la Edificación responde así a la necesidad de actualizar este conjunto de normas, pero también de completar una regulación que hasta 1999 había sido dispersa y poco clara.

2006: CTE Código Técnico de la Edificación. Trata de plasmar en especificaciones los objetivos de la LOE y a traducir al lenguaje técnico estas aspiraciones.

2013: Actualización del Documento Básico HE, Ahorro de energía. Esta actualización modifica las exigencias térmicas para nuevos edificios y por primera vez incluye la exigencia a edificios existentes.

2.5.2. Normativa relativa a la Eficiencia Energética

2.5.2.1. Normativa Europea

A partir de 2008, en la Unión Europea se concretaron los conocidos objetivos del 20-20-20, mediante el Paquete Energía y Cambio Climático, enfocados a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la eficiencia energética e incrementar la proporción de energías renovables, objetivos destinados a ser cumplidos en el horizonte de 2020 a través de diversa legislación europea.

La estrategia europea en materia de energía y cambio climático establece los objetivos que deben cumplirse en el horizonte a corto plazo (2020), el horizonte ampliado (2030) y el horizonte a largo plazo (2050).

Horizonte a corto plazo: 2020

La estrategia “Europa 2020” para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador ha incluido cinco objetivos principales que ponen de manifiesto cuál debería ser la situación de la UE en 2020. Uno de ellos se refiere al clima y la energía, donde cabe destacar la aprobación de la Directiva 2010/31/UE (Comisión Europea, 2010), relativa a las medidas necesarias para reducir el consumo de energía en la Unión Europea, utilizando un mayor uso de la energía procedente de fuentes renovables y cumpliendo el Protocolo de Kioto, con la consecución del triple objetivo para 2020, consistente en:

- 20% de reducción de las emisiones totales de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990 y un 30% en el caso de lograrse un acuerdo internacional.
- 20% de reducción del consumo energético.
- 20% del consumo total de energía, procedente de fuentes renovables.

Esta Directiva Europea, en vigor en la actualidad, deroga la Directiva 2002/91/CE. Adicionalmente, menciona de manera reiterativa dos puntos clave:

- La rehabilitación de edificios existentes con la misma importancia o más que los de nueva construcción, impulsando medidas concretas.
- La importancia de la adecuación del edificio a las condiciones climáticas y particulares del lugar y la aplicación de las estrategias pasivas derivadas de ellas, como medidas importantes para mejorar la eficiencia energética, así como el rendimiento de las instalaciones.

En estos momentos, la UE reconoce que está en vías de alcanzar dos de esos objetivos, pero que no logrará su objetivo de eficiencia energética si no se realizan mayores esfuerzos. Por tanto, la prioridad sigue siendo alcanzar todos los objetivos establecidos para 2020 (Ministerio de Fomento, 2014).

Horizonte ampliado: 2030

En el año 2014, en Europa se plantea la necesidad de realizar un cambio basado en el aprendizaje de la etapa anterior y formular una propuesta para que sus políticas abarquen un horizonte más amplio, que alcance al año 2030. En este sentido, la Comisión quiere avanzar con mayor intensidad hacia unos ambiciosos objetivos de clima y energía para el año 2030 y para ello ha venido dando pasos previos, como el lanzamiento del “Libro Verde” (Comisión Europea, 2013), publicado en 2013, que lanzó una consulta pública en este campo entre todos los sectores.

Resultado de ello, ha sido la publicación el 22 de enero de 2014 de la Comunicación COM(2014)15 final (Comisión Europea, 2014), “Un marco estratégico en materia de clima y energía para el periodo 2020-2030”, dirigida al Parlamento europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo, y al Comité de las Regiones. La Comisión, mediante esta comunicación invita al Consejo y el Parlamento Europeo a que, antes de que finalice 2014, convengan que la Unión Europea debe comprometerse a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40 % a más tardar a principios de 2015 en el marco de las negociaciones que concluirán en París en diciembre de 2015. La Unión también debe estar dispuesta a contribuir positivamente a la cumbre organizada por el Secretario General de las Naciones Unidas en septiembre de 2014.

De la misma manera la Comisión pretende que se refrende un objetivo a nivel de la UE de, como mínimo, el 27 % como cuota de la energía procedente de fuentes renovables que se ha de consumir en la UE antes de 2030 y que debe alcanzarse mediante compromisos claros de los propios Estados miembros, con el apoyo de mecanismos e indicadores de aplicación reforzados a escala de la UE.

Horizonte a largo plazo: 2050

En marzo de 2011, sabiéndose desde hace tiempo que el cambio climático constituye uno de los factores determinantes a largo plazo que requieren una acción coherente, y que apunte más lejos en el horizonte, se publicó la Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones denominada “Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050” (Comisión Europea, 2011). En esta hoja de ruta se proporciona a los Estados miembros de la UE un marco general a largo plazo para abordar el problema de la sostenibilidad y los efectos transfronterizos de fenómenos que no pueden solucionarse solo a nivel nacional.

A continuación, se hace un listado de las Directivas aprobadas en materia de energía/clima, así como los documentos publicados con el fin de reafirmar los compromisos que debe cumplir la edificación para reducir su consumo energético asociado:

Directiva 80/106/CEE. Relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de construcción.

Directiva 93/76/CEE. Relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética (SAVE).

Directiva 2002/91/CE. Relativa al rendimiento energético de los edificios y en consonancia con los compromisos del Protocolo de Kioto. Es la primera Directiva en la que se hace referencia a la rehabilitación.

Directiva 2006/32/CE. Relativa a la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos. Establece la obligatoriedad para los estados miembros de presentar a la Comisión Europea un Plan de Acción Nacional (*National Energy Efficiency Action Plan*, NEEAP) donde se fijan las actuaciones y mecanismos para conseguir los objetivos fijados.

Directiva 2009/28/CE. Relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables.

Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del consejo de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios.

COM(2008) 772 final. Se plantean distintas medidas para mejorar la eficiencia energética y así cumplir con los objetivos del paquete “20-20-20” mencionado anteriormente.

COM(2011) 112 final. Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050. El objetivo es la reducción de las emisiones internas de la UE en un 80 % de aquí a 2050 respecto a 1990.

COM(2011) 370. Propuesta de nueva directiva en materia de Eficiencia Energética por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE.

COM(2014)15 final. Un marco estratégico en materia de clima y energía para el periodo 2020-2030.

2.5.2.2. Normativa Española

La trasposición de la Directiva 2002/91/CE y posteriormente la Directiva 2010/31/UE a la legislación nacional ha supuesto la aprobación de las siguientes iniciativas y marcos regulatorios:

Código Técnico de la Edificación (CTE). Entra en vigor en 2006. Según las estimaciones del Instituto para la diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), su aplicación puede representar un ahorro energético de entre el 30 y el 40% y una reducción de las emisiones de CO₂ de entre el 40 y el 55% en el sector. Desde entonces se han venido sucediéndose diferentes actualizaciones. La más relevante, en términos de eficiencia energética, es la actualización del Documento Básico HE Ahorro de Energía del pasado 12 de septiembre de 2013. En ésta se modifican las exigencias para nueva edificación, siendo ahora más estrictas en lo que a consumo y demanda de energía se refiere, e incluyendo por primera vez la aplicación de este Documento Básico en edificios sometidos a una rehabilitación.

Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE). Entra en vigor en el año 2007.

Real Decreto 47/2007 de Certificación de Eficiencia Energética de Edificios.

Transpone la metodología de cálculo establecida en la Directiva 2002/91/CE (*Energy Performance of Buildings Directive- EPBD*), actualizada recientemente por la Directiva 2010/31/UE. Establece la obligación de poner a disposición de los compradores o usuarios de los edificios un certificado de eficiencia energética. Este certificado deberá incluir información objetiva sobre las características energéticas de los edificios de forma que se pueda valorar y comparar su eficiencia energética, con el fin de favorecer la promoción de edificios de alta eficiencia energética y las inversiones en ahorro de energía.

Estrategia Española de Eficiencia Energética (E4). Plan de Acción 2005-2007 de Ahorro y Eficiencia Energética y Plan de Acción 2008-2012 de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética. Objetivos concretos de reducción de emisiones de CO₂ y ahorros energéticos por sectores.

Plan Estatal de Vivienda y Rehabilitación 2009-2012. Real Decreto 2066/2008, de 12 de diciembre, por el que se regula el Plan Estatal de Vivienda y Rehabilitación 2009-2012.

Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbana.

Ley. Esta Ley tiene por objeto regular las condiciones básicas que garanticen un desarrollo sostenible, competitivo y eficiente del medio urbano, mediante el impulso y el fomento de las actuaciones que conduzcan a la rehabilitación de los edificios y a la regeneración y renovación de los tejidos urbanos existentes, cuando sean necesarias para asegurar a los ciudadanos una adecuada calidad de vida y la efectividad de su derecho a disfrutar de una vivienda digna y adecuada.

Real Decreto 235/2013 de Certificación de Eficiencia Energética de Edificios. Esta ley transpone parcialmente la directiva 2010/31/UE en lo relativo a la certificación energética de edificios, refundiendo el real Decreto 47/2007, con la incorporación del Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios existentes, teniendo en consideración la experiencia de su aplicación en los últimos cinco años.

Programa de Ayudas para la Rehabilitación Energética de Edificios existentes (Programa PAREER-CRECE). Este programa se puso en marcha en 2015 con el fin de incentivar y promover la realización de actuaciones de reforma que favorezcan el ahorro energético, la mejora de la eficiencia energética, el aprovechamiento de las energías renovables, así como la reducción de emisiones de dióxido de carbono, en los edificios existentes.

2.5.3. Normativa relativa a la sostenibilidad en la edificación

El marco normativo existente en materia de sostenibilidad en la edificación ha sido desarrollado por parte de ISO, en consonancia con su homólogo CEN, siendo los comités técnicos ISO TC 59 y CEN TC/350 *Sustainability of construction Works*, quienes han asumido mayor protagonismo (Rivela, 2012).

El marco genérico de evaluación de la sostenibilidad queda definido en el ámbito internacional mediante la norma ISO 15392:2008 e ISO/TS 21929-1:2006. A nivel europeo se establece mediante la norma EN 15643-1:2010. Se definen tres líneas de trabajo, que en el caso del Comité CEN TC/350, se desarrolla en paralelo y con un planteamiento coherente y armonizado con respecto a las normas desarrolladas en el seno del ISO.

Figura 2.2. Esquema Comité CEN TC/350 *Sustainability of construction Works*. Fuente: EN 15643-1:2010.

2.5.3.1. Evaluación del comportamiento ambiental

La metodología de referencia para la evaluación del impacto ambiental es el ACV, más conocido por sus iniciales en inglés LCA. El SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) lo define como un “proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno; para determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente, y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental. El estudio incluye el ciclo completo del producto, proceso o actividad, teniendo en cuenta las etapas de extracción y procesamiento de materias primas; producción, transporte y distribución; uso, reutilización y mantenimiento y reciclado y disposición del residuo”. A nivel internacional, el ACV se rige por las normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006).

A nivel Europeo, el Comité CEN TC/350, con un claro objetivo de armonización, ha desarrollado las siguientes normativas en el ámbito ambiental:

- EN 15643-2 Sostenibilidad en la construcción Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 2: Marco para la evaluación del ambiental (UNE-EN 15643-2, 2012)
- EN 15978 Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de edificios. Métodos de cálculo (UNE-EN 15978, 2012)
- EN 15804+A1 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción (UNE-EN 15804+A1, 2014)
- TR 15941 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Metodología para la selección y uso de datos genéricos (UNE-CEN/TR 15941, 2011)

2.5.3.2. Evaluación del comportamiento económico

La evaluación del comportamiento económico se realiza mediante el análisis del Coste del Ciclo de Vida (CCV), más conocido por sus iniciales en inglés LCC (Life Cycle Cost). La normativa de referencia a nivel internacional es la Norma ISO 15686-5 (2008). Esta norma tiene los siguientes objetivos:

- Formular una terminología y metodología común para el CCV.
- Permitir la utilización práctica del CCV en la industria de la construcción.
- Permitir la utilización de las técnicas CCV en el ámbito del contrato de obras de edificación.
- Mejorar la toma de decisiones y la evaluación de procesos en las distintas etapas de cada proyecto.
- Abordar las incertidumbres y riesgos y mejorar la fiabilidad de las predicciones de los análisis CCV.
- Facilitar un marco que permita realizar análisis comparativos de costes.

El comité CEN había planteado ya el marco de trabajo, pero no ha sido hasta junio 2015 cuando se ha aprobado la normativa para el método de cálculo. Así, las normativas desarrolladas a nivel europeo son:

- EN 15643-4 Sostenibilidad en la construcción Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 4: Marco para la evaluación del comportamiento económico (UNE-EN 15643-4, 2012).
- EN 16627:2015 Sostenibilidad en la obras de construcción. Evaluación del comportamiento económico de los edificios. Métodos de cálculo (UNE-EN 16627, 2015).

2.6. Conclusiones

La extensa revisión bibliográfica que se ha realizado ha permitido constatar que, si bien existe cierto consenso en relación a las estrategias de rehabilitación implementadas, las metodologías de evaluación que se han considerado a nivel internacional difieren ampliamente. Son muchos los autores que indican que es preferible actuar en primer lugar sobre la envolvente mediante medidas pasivas, para posteriormente mejorar la eficiencia de las instalaciones y por último, implantar energías renovables. Entre las soluciones más comunes se encuentran el aislamiento de la envolvente, el cambio de ventanas y el sellado de infiltraciones. En cuanto a las metodologías de evaluación, algunos autores se centran en la evaluación ambiental, otros optan por la evaluación económica, y, en los últimos años, cada vez son más los autores que abogan por metodologías multicriterio, combinando la dimensión ambiental y económica. La dimensión social, tercer pilar de la sostenibilidad apenas ha sido considerada en la evaluación.

Los resultados de la presente revisión enfatizan la necesidad de aplicar el Enfoque de Ciclo de Vida para determinar las estrategias óptimas de rehabilitación, así como el potencial de mejora real de la rehabilitación del parque residencial. Como se ha observado, a medida que se reduce la demanda energética del edificio durante la fase de uso, la fase de construcción adquiere mayor importancia, influyendo en los resultados.

A nivel nacional, en los últimos años se han llevado a cabo numerosos programas e iniciativas para promover la rehabilitación residencial. Se ha observado que, al igual que en el contexto internacional, las estrategias de rehabilitación son similares, dando prioridad a la mejora de la envolvente. En relación a las metodologías de evaluación empleadas, cabe destacar que se han centrado únicamente en el ahorro energético y de emisiones de CO₂ durante la fase de uso, descartando la evaluación en el resto de fases del ciclo de vida del edificio.

Finalmente, la revisión del marco normativo ha permitido establecer la evolución de las políticas relativas a la eficiencia energética de los edificios, tanto en el contexto europeo como en el español, detectando la rápida evolución de los últimos años de las normativas aplicables a la edificación, siendo cada vez más exigentes en términos de demanda energética y emisiones de CO₂, ante la necesidad de cumplir con los compromisos adquiridos tras la adhesión al protocolo de Kioto. Asimismo, cabe destacar el trabajo realizado por el Comité Europeo de Normalización (CEN) TC/350, con un claro

objetivo de armonización, en el desarrollo de normativas relativa a la evaluación de la sostenibilidad en la edificación.

A modo de resumen, a nivel internacional se observa una tendencia similar en cuanto a las estrategias de rehabilitación empleadas, pero estas estrategias son evaluadas aplicando un amplio espectro de métodos y con carácter general, sin considerar una aproximación global que contemple todas las implicaciones a lo largo de ciclo de vida, por lo que no se pueden establecer realmente conclusiones en relación a su pertinencia.

2.7. Bibliografía

ADIGSA, 2003a. Passive House Retrofit. Caso práctico N°1 de España.

ADIGSA, 2003b. Passive House Retrofit. Caso práctico N°2 de España.

ADIGSA, 2006. Estudios previos y proyectos piloto. REVITASUD - ADIGSA. *Conferencia final - Zaragoza. 22 de noviembre de 2006*. Disponible en: https://www.google.es/search?q=Estudios+previos+y+proyecto+piloto.+Revitasud+-+Adigsa.+Conferencia+final+Zaragoza.+22+de+noviembre+de+2006&rlz=1C1KMZB_enES572ES572&oq=Estudios+previos+y+proyecto+piloto.+Revitasud+-+Adigsa.+Conferencia+final+Zaragoza.+22+de+noviembre+de+2006&aqs=chrome..69i57.415j0j4&sourceid=chrome&espv=210&es_sm=93&ie=UTF-8.

AHERN, C., GRIFFITHS, P. y O'FLAHERTY, M., 2013. State of the Irish housing stock—Modelling the heat losses of Ireland's existing detached rural housing stock & estimating the benefit of thermal retrofit measures on this stock. *Energy Policy*, vol. 55, pp. 139-151. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2012.11.039.

AKTAS, C.B. y BILEC, M.M., 2012. Impact of lifetime on US residential building LCA results. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, no. 3, pp. 337-349. ISSN 0948-3349. DOI 10.1007/s11367-011-0363-x.

ALANNE, K., 2004. Selection of renovation actions using multi-criteria «knapsack» model. *Automation in Construction*, vol. 13, no. 3, pp. 377-391. ISSN 09265805. DOI 10.1016/j.autcon.2003.12.004.

ALLACKER, K., 2010. *Sustainable Building: The development of an evaluation method*. Doctoral dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.

ALLACKER, K., 2012. Environmental and economic optimisation of the floor on grade in residential buildings. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, no. 6, pp. 813-827. ISSN 0948-3349. DOI 10.1007/s11367-012-0402-2.

ALLACKER, K. y DE TROYER, F., 2007. Combining environmental impact and financial cost calculations with quality assessment at the building level. En: M. HORNER, C. HARDCASTLE, A. PRICE y J. BEBBINGTON (eds.), *International Conference on Whole Life Urban Sustainability and its Assessment*. Glasgow:

AL-RAGOM, F., 2003. Retrofitting residential buildings in hot and arid climates. *Energy Conversion and Management*, vol. 44, no. 14, pp. 2309-2319. ISSN 01968904. DOI 10.1016/S0196-8904(02)00256-X.

AMSTALDEN, R.W., KOST, M., NATHANI, C. y IMBODEN, D.M., 2007. Economic potential of energy-efficient retrofitting in the Swiss residential building sector: The effects of policy instruments and energy price expectations. *Energy Policy*, vol. 35, no. 3, pp.

1819-1829. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2006.05.018.

ANASTASELOS, D., GIAMA, E. y PAPADOPOULOS, A.M., 2009. An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions. *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 11, pp. 1165-1171. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.06.003.

ANASTASELOS, D., OXIZIDIS, S. y PAPADOPOULOS, A.M., 2011. Energy, environmental and economic optimization of thermal insulation solutions by means of an integrated decision support system. *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 2-3, pp. 686-694. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.11.013.

ANTIPOVA, E., BOER, D., GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G., CABEZA, L.F. y JIMÉNEZ, L., 2014. Multi-Objective Optimization coupled with Life Cycle Assessment for Retrofitting Buildings. *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 92-99. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.07.001.

ARDENTE, F., BECCALI, M., CELLURA, M. y MISTRETTA, M., 2011. Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 460-470. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2010.09.022.

ARROYO CASTILLO, A., 2010. San Cristóbal de los Ángeles. Un caso singular. *10º Congreso Nacional del Medio Ambiente (Conama 10)*. pp. 1-47. Disponible en: http://www.conama10.es/conama10/download/files/STs2010/1000000349_ppt_AAroyo.pdf.

ASADI, E., DA SILVA, M.G., ANTUNES, C.H. y DIAS, L., 2012a. A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB. *Building and Environment*, vol. 56, pp. 370-378. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2012.04.005.

ASADI, E., DA SILVA, M.G., ANTUNES, C.H. y DIAS, L., 2012b. Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy and Buildings*, vol. 44, pp. 81-87. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.10.016.

ASIF, M., MUNEER, T. y KELLEY, R., 2007. Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Building and Environment*, vol. 42, no. 3, pp. 1391-1394. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2005.11.023.

ASSIEGO DE LARRIVA, R., CALLEJA RODRÍGUEZ, G., CEJUDO LÓPEZ, J.M., RAUGEI, M. y FULLANA I PALMER, P., 2014. A decision-making LCA for energy refurbishment of buildings: Conditions of comfort. *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 333-342.

AUDENAERT, A., CLEYN, S.H. De y BUYLE, M., 2012. LCA of low-energy flats using the

Eco-indicator 99 method: Impact of insulation materials. *Energy and Buildings*, vol. 47, no. 0, pp. 68-73.

BAKER, N. y STEEMERS, K., 2000. *Energy and Environment in Architecture: A Technical Design Guide*. London: Taylor & Francis.

BECCALI, M., CELLURA, M., FONTANA, M., LONGO, S. y MISTRETTA, M., 2013. Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 283-293. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2013.05.040.

BENNETT, J. y NORMAN, G., 1987. Life Cycle Costing. *Construction Management and Economics*, vol. 5, no. Special Issue.

BIERER, A., GÖTZE, U., MEYNERTS, L. y SYGULLA, R., 2015. Integrating life cycle costing and life cycle assessment using extended material flow cost accounting. *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, pp. 1289-1301. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.08.036.

BIN, G. y PARKER, P., 2012. Measuring buildings for sustainability: Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home – The REEP House. *Applied Energy*, vol. 93, pp. 24-32. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2011.05.055.

BLEVISS, D. y GRAVITZ, A., 1984. Energy Conservation in Rental Housing. *Energy Conservation Coalition*,

BOJIĆ, M., DJORDJEVIĆ, S., STEFANOVIĆ, A., MILETIĆ, M. y CVETKOVIĆ, D., 2012. Decreasing energy consumption in thermally non-insulated old house via refurbishment. *Energy and Buildings*, vol. 54, pp. 503-510. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.03.045.

BOLIN, C.A. y SMITH, S., 2011. Life cycle assessment of ACQ-treated lumber with comparison to wood plastic composite decking. *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 6–7, pp. 620-629.

BRE, 1994. *Private communication, Building Research Establishment, Garston, Watford, U.K.*

BROWN, N.W.O., MALMQVIST, T., BAI, W. y MOLINARI, M., 2013. Sustainability assessment of renovation packages for increased energy efficiency for multi-family buildings in Sweden. *Building and Environment*, vol. 61, pp. 140-148. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2012.11.019.

BURATTI, C., BELLONI, E. y PALLADINO, D., 2014. Evolutive Housing System: Refurbishment with new technologies and unsteady simulations of energy performance. *Energy and Buildings*, vol. 74, pp. 173-181. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.01.046.

BYMAN, K. y JERNELIUS, S., 2012. The economics of renovation projects with energy-related investments. Stockholm. Disponible en: <http://www.stockholm.se/energicentrum>.

CELLURA, M., DI GANGI, A., LONGO, S. y ORIOLI, A., 2013. An Italian input-output model for the assessment of energy and environmental benefits arising from retrofit actions of buildings. *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 97-106. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.02.056.

CELLURA, M., GUARINO, F., LONGO, S. y MISTRETTA, M., 2014. Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study. *Energy and Buildings*, vol. 72, pp. 371-381. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.12.046.

CELLURA, M., GUARINO, F., LONGO, S., MISTRETTA, M. y ORIOLI, A., 2013. The role of the building sector for reducing energy consumption and greenhouse gases: An Italian case study. *Renewable Energy*, vol. 60, pp. 586-597. ISSN 09601481. DOI 10.1016/j.renene.2013.06.019.

CETINER, I. y EDIS, E., 2014. An environmental and economic sustainability assessment method for the retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*, vol. 74, pp. 132-140. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.01.020.

CHANTRELLE, F.P., LAHMIDI, H., KEILHOLZ, W., MANKIBI, M. El y MICHEL, P., 2011. Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Applied Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1386-1394. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2010.10.002.

CHEN, T., BURNETT, J. y CHAU, C., 2001. Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong. *Energy*, vol. 26, no. 4, pp. 323-340. ISSN 03605442. DOI 10.1016/S0360-5442(01)00006-8.

COHEN, S., GOLDMAN, C. y HARRIS, J., 1991. Energy savings and economics of retrofitting single-family buildings. *Energy and Buildings*, vol. 17, no. 4, pp. 297-311. ISSN 03787788. DOI 10.1016/0378-7788(91)90012-R.

COMISIÓN EUROPEA, 2010. Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Diario Oficial de la Unión Europea*, vol. L153, pp. 13-35.

COMISIÓN EUROPEA, 2011. *Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050*. COM(2011) 112 final.

COMISIÓN EUROPEA, 2013. *Libro Verde. Un marco para las políticas de clima y energía en 2030*. COM(2013) 169 final.

COMISIÓN EUROPEA, 2014. *Un marco estratégico en materia de clima y energía para el periodo 2020-2030*. COM(2014) 15 final.

CUCHÍ, A. y SWEATMAN, P., 2011b. Una visión-país para el sector de la edificación en España. Hoja de ruta para un nuevo sector de la vivienda.

CUCHÍ, A. y SWEATMAN, P., 2012c. Informe GTR 2012. Actuaciones para rehabilitaciones energéticas.

CUÉLLAR-FRANCA, R.M. y AZAPAGIC, A., 2013. Life cycle cost analysis of the UK housing stock. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 19, no. 1, pp. 174-193. ISSN 0948-3349. DOI 10.1007/s11367-013-0610-4.

DALL'O', G., GALANTE, A. y PASETTI, G., 2012a. A methodology for evaluating the potential energy savings of retrofitting residential building stocks. *Sustainable Cities and Society*, vol. 4, pp. 12-21. ISSN 22106707. DOI 10.1016/j.scs.2012.01.004.

DALL'O', G., GALANTE, A. y TORRI, M., 2012b. A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy and Buildings*, vol. 48, pp. 211-219. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.01.034.

DE ANGELIS, E., DOTELLI, G., PITTAU, F., LA TORRE, A., PORCINO, C., PANSA, G. y VILLA, N., 2013. LCA and LCC based Energy Optimization of Building Renovation Strategies. En: A. PASSER, K. HÖFLER y P. MAYDL (eds.), *International Sustainable Building Conference*. Graz: pp. 77-86. DOI 10.3217/978-3-85125-299-6.

DESOGUS, G., DI PILLA, L., MURA, S., PISANO, G.L. y RICCIU, R., 2013. Economic efficiency of social housing thermal upgrade in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, vol. 57, pp. 354-360. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.11.016.

DIAKAKI, C., GRIGOROUDIS, E., KABELIS, N., KOLOKOTSA, D., KALAITZAKIS, K. y STAVRAKAKIS, G., 2010. A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings. *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 5483-5496. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2010.05.012.

DIAKAKI, C., GRIGOROUDIS, E. y KOLOKOTASA, D., 2008. Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 9, pp. 1747-1754. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2008.03.002.

DODOO, A., GUSTAVSSON, L. y SATHRE, R., 2010. Life cycle primary energy implication of retrofitting a wood-framed apartment building to passive house standard. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, no. 12, pp. 1152-1160. ISSN 09213449. DOI 10.1016/j.resconrec.2010.03.010.

DYLEWSKI, R. y ADAMCZYK, J., 2012. Economic and ecological indicators for thermal insulating building investments. *Energy and Buildings*, vol. 54, pp. 88-95. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.07.021.

EPSTEIN, M.J., 1996. *Measuring corporate environmental performance*. Chicago: Irwin

Professional Publishing.

GALVIN, R. y SUNIKKA-BLANK, M., 2013. Economic viability in thermal retrofit policies: Learning from ten years of experience in Germany. *Energy Policy*, vol. 54, pp. 343-351. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2012.11.044.

GATERELL, M.R. y MCEVOY, M.E., 2005a. The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings. *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 9, pp. 982-995. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.12.015.

GATERELL, M.R. y MCEVOY, M.E., 2005b. The impact of energy externalities on the cost effectiveness of energy efficiency measures applied to dwellings. *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 10, pp. 1017-1027. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.12.004.

GERO, J.S., D'CRUZ, N. y RADFORD, A.D., 1983. Energy in context: A multicriteria model for building design. *Building and Environment*, vol. 18, no. 3, pp. 99-107. ISSN 03601323. DOI 10.1016/0360-1323(83)90001-X.

GERVÁSIO, H., SANTOS, P., MARTINS, R. y DA SILVA, L.S., 2014. A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design. *Building and Environment*, vol. 73, no. 0, pp. 256-270.

GOLDMAN, C., 1988. Retrofit experience in U.S. multifamily buildings: Energy savings, costs, and economics. *Energy*, vol. 13, no. 11, pp. 797-811. ISSN 03605442. DOI 10.1016/0360-5442(88)90085-0.

GONZÁLEZ, M.J. y NAVARRO, J.G., 2006. Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. *Building and Environment*, vol. 41, no. 7, pp. 902-909.

GOODACRE, C., SHARPLES, S. y SMITH, P., 2002. Integrating energy efficiency with the social agenda in sustainability. *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 1, pp. 53-61.

GORGOLEWSKI, M., 1995. Optimising renovation strategies for energy conservation in housing. *Building and Environment*, vol. 30, no. 4, pp. 583-589.

GUERRA SANTIN, O., ITARD, L. y VISSCHER, H., 2009. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 11, pp. 1223-1232. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.07.002.

GUERRA-SANTIN, O. y ITARD, L., 2010. Occupants' behaviour: determinants and effects on residential heating consumption. *Building Research & Information*, vol. 38, no. 3, pp. 318-338. ISSN 0961-3218. DOI 10.1080/09613211003661074.

GUSTAVSSON, G., 2012. WP 4.1.2 Two models for Life Cycle Cost in Växjö, Sweden. pp. 1-8.

GUSTAVSSON, L. y JOELSSON, A., 2010. Life cycle primary energy analysis of residential buildings. *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 2, pp. 210-220. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.08.017.

GUSTAVSSON, L., JOELSSON, A. y SATHRE, R., 2010. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 2, pp. 230-242. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.08.018.

HÄKKINEN, T., 2012. Systematic method for the sustainability analysis of refurbishment concepts of exterior walls. *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 783-790. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.084.

HASAN, A., VUOLLE, M. y SIRÉN, K., 2008. Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. *Building and Environment*, vol. 43, no. 12, pp. 2022-2034. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2007.12.003.

HERNANDEZ, P. y KENNY, P., 2011. Development of a methodology for life cycle building energy ratings. *Energy Policy*, vol. 39, no. 6, pp. 3779-3788. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2011.04.006.

HOHMEYER, O., 2002. The Social Costs of Energy Consumption.

IEA, 2014. Energy in Buildings and Communities Programme, Annex 57: Evaluation of Embodied Energy and CO₂eq for Building Construction.

ISO 14040, 2006. *Gestión ambiental Análisis del ciclo de vida Principios y marco de referencia*.

ISO 14044, 2006. *Gestión ambiental Análisis del ciclo de vida Requisitos y directrices*.

ISO 15686-5, 2008. *Buildings and constructed assets -- Service-life planning -- Part 5: Life-cycle costing*.

JAGGS, M. y PALMER, J., 2000. Energy performance indoor environmental quality retrofit — a European diagnosis and decision making method for building refurbishment. *Energy and Buildings*, vol. 31, no. 2, pp. 97-101.

JUAN, Y.-K., KIM, J.H., ROPER, K. y CASTRO-LACOUTURE, D., 2009. GA-based decision support system for housing condition assessment and refurbishment strategies. *Automation in Construction*, vol. 18, no. 4, pp. 394-401. ISSN 09265805. DOI 10.1016/j.autcon.2008.10.006.

KEOLEIAN, G.A., BLANCHARD, S. y REPPE, P., 2000. Life-Cycle Energy, Costs, and Strategies for Improving a Single-Family House. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 4, no.

2, pp. 135-156.

KIRK, S.J. y DELL'ISOLA, A.J., 1995. *Life cycle costing for design professionals*. New York: McGraw-Hill.

KOHLER, N., 1986. *Analyse énergétique de la construction de l'utilisation et de la démolition de bâtiments*.

KOHLER, N. y MOFFATT, S., 2003. Life-cycle analysis of the built environment. *UNEP Industry and Environment*, vol. April - Se, pp. 17-21.

KRARTI, M., 2011. *Energy Audit of Building Systems: An Engineering Approach*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group.

KREITH, E. y GOSWAMI, D.Y., 2008. *Energy Management and Conservation handbook*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor and Francis Group.

MAGNIER, L. y HAGHIGHAT, F., 2010. Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network. *Building and Environment*, vol. 45, no. 3, pp. 739-746. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2009.08.016.

MAHLIA, T.M.I., SAID, M.F.M., MASJUKI, H.H. y TAMJIS, M.R., 2005. Cost-benefit analysis and emission reduction of lighting retrofits in residential sector. *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 6, pp. 573-578. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.08.009.

MALMQVIST, T., GLAUMANN, M., SCARPELLINI, S., ZABALZA, I., ARANDA, A., LLERA, E. y DÍAZ, S., 2011. Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. *Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 1900-1907. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2010.03.026.

MARLER, R.T. y ARORA, J.S., 2004. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 26, no. 6, pp. 369-395. ISSN 1615147X. DOI 10.1007/s00158-003-0368-6.

MARTINAITIS, V., KAZAKEVIČIUS, E. y VITKAUSKAS, A., 2007. A two-factor method for appraising building renovation and energy efficiency improvement projects. *Energy Policy*, vol. 35, no. 1, pp. 192-201. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2005.11.003.

MATA, É., SASIC KALAGASIDIS, A. y JOHNSON, F., 2013a. A modelling strategy for energy, carbon, and cost assessments of building stocks. *Energy and Buildings*, vol. 56, pp. 100-108. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.09.037.

MATA, É., SASIC KALAGASIDIS, A. y JOHNSON, F., 2013b. Energy usage and technical potential for energy saving measures in the Swedish residential building stock. *Energy Policy*, vol. 55, pp. 404-414. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2012.12.023.

MEQUIGNON, M., ADOLPHE, L., THELLIER, F. y AIT HADDOU, H., 2013. Impact of the lifespan of building external walls on greenhouse gas index. *Building and Environment*, vol. 59, pp. 654-661. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2012.09.020.

MINISTERIO DE ECONOMÍA, 2003. *Orden ECO/805/2003, de 27 de marzo, sobre normas de valoración de bienes inmuebles y de determinados derechos para ciertas finalidades financieras*. BOE núm 85.

MINISTERIO DE FOMENTO, 2014. Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España. En desarrollo del artículo 4 de la Directiva 2012/27/UE.

MOORE, T. y MORRISSEY, J., 2014. Lifecycle costing sensitivities for zero energy housing in Melbourne, Australia. *Energy and Buildings*, vol. 79, pp. 1-11. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.04.050.

MORRISSEY, J. y HORNE, R.E., 2011. Life cycle cost implications of energy efficiency measures in new residential buildings. *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 4, pp. 915-924. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.12.013.

MULLALY, C., 1998. Home energy use behaviour: a necessary component of successful local government home energy conservation (LGHEC) programs. *Energy Policy*, vol. 26, no. 14, pp. 1041-1052. ISSN 03014215. DOI 10.1016/S0301-4215(98)00046-9.

NEMRY, F., UIHLEIN, A., COLODEL, C.M., WETZEL, C., BRAUNE, A., WITTSTOCK, B., HASAN, I., KREISSI, J., GALLON, N., NIEMEIER, S. y FRECH, Y., 2010. Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs. *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 7, pp. 976-984. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.01.009.

NICOLETTI, G.M., NOTARNICOLA, B. y TASSIELLI, G., 2002. Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles. *Journal of Cleaner Production*, vol. 10, no. 3, pp. 283-296.

ÖBERG, M., 2005. *Integrated Life Cycle Design - Applied to concrete multi-dwelling buildings*. Div of Building Materials LTH, Lund university.

OPTIS, M. y WILD, P., 2010. Inadequate documentation in published life cycle energy reports on buildings. *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, no. 7, pp. 644-651. ISSN 09483349. DOI 10.1007/s11367-010-0203-4.

OSTERMEYER, Y., WALLBAUM, H. y REUTER, F., 2013. Multidimensional Pareto optimization as an approach for site-specific building refurbishment solutions applicable for life cycle sustainability assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, no. 9, pp. 1762-1779. ISSN 0948-3349. DOI 10.1007/s11367-013-0548-6.

OTA, 1982. *Energy Efficiency of Buildings in Cities*.

OTT, W., BOLLIGER, R., RITTER, V., CITHERLET, S., PERRISET, B., ALMEIDA, M. De y FERREIRA, M., 2014. IEA EBC Annex 56: Methodology for Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation, Methodology and Assessment of Renovation Measures by Parametric Calculations.

OUYANG, J., LU, M., LI, B., WANG, C. y HOKAO, K., 2011a. Economic analysis of upgrading aging residential buildings in China based on dynamic energy consumption and energy price in a market economy. *Energy Policy*, vol. 39, no. 9, pp. 4902-4910. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2011.06.025.

OUYANG, J., WANG, C., LI, H. y HOKAO, K., 2011b. A methodology for energy-efficient renovation of existing residential buildings in China and case study. *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 9, pp. 2203-2210. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.05.005.

OWENS, J. y WILHITE, H., 1988. Household energy behavior in Nordic countries—an unrealized energy saving potential. *Energy*, vol. 13, no. 12, pp. 853-859. ISSN 03605442. DOI 10.1016/0360-5442(88)90050-3.

PAIHO, S., HEDMAN, Å., ABDURAFIKOV, R., HOANG, H., SEPPONEN, M., KOUHIA, I. y MEINANDER, M., 2013. Energy saving potentials of Moscow apartment buildings in residential districts. *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 706-713. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.07.084.

PAPADOPOULOS, A.M., THEODOSIOU, T.G. y KARATZAS, K.D., 2002. Feasibility of energy saving renovation measures in urban buildings. *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 5, pp. 455-466.

PÉREZ QUINTANA, V., 2007. San Cristóbal de los Ángeles. Experiencia singular de revitalización de un barrio de la periferia madrileña. Informe sobre el proceso de reestructuración y rehabilitación de San Cristóbal de los ángeles. Madrid. [Consulta: 5 marzo 2014]. Disponible en:

http://www.aavvmadrid.org/intercambio/FEC/Rehabilitacion_SanCristobal_2007.pdf.

PERKINS, F., 1994. *Practical cost benefit analysis. Basic concepts and applications*. South Melbourne, Australia: MacMillan.

PEUPORTIER, B., THIERS, S. y GUIAVARCH, A., 2013. Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, vol. 39, pp. 73-78. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.08.041.

PIKE, R. y DOBBINS, R., 1986. *Investment decisions and financial strategy*. Hemel Hempstead, UK: Philip Allan.

POMBO, O., RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. The challenge of sustainable building

renovation: assessment of current criteria and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, vol. 123, pp. 88-100. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.06.137.

PRAT, F. y WADEL, G., 2010. La experiencia de rehabilitación de vivienda en España bajo parámetros ambientales. Un estado del arte. *SB10mad sustainable building conference*. Madrid:

REMER, D.S. y NIETO, A.P., 1995. A compendium and comparison of 25 project evaluation techniques. Part 1: Net present value and rate of return methods. *International Journal of Production Economics*, vol. 42, no. 1, pp. 79-96. ISSN 09255273. DOI 10.1016/0925-5273(95)00104-2.

REY, E., 2004. Office building retrofitting strategies: multicriteria approach of an architectural and technical issue. *Energy and Buildings*, vol. 36, no. 4, pp. 367-372. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.01.015.

RISHOLT, B., TIME, B. y HESTNES, A.G., 2013. Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings based on energy, economy and home quality indicators. *Energy and Buildings*, vol. 60, pp. 217-224. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.12.017.

RISTIMÄKI, M., SÄYNÄJOKI, A., HEINONEN, J. y JUNNILA, S., 2013. Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design. *Energy*, vol. 63, pp. 168-179. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2013.10.030.

RIVELA, B., 2012. *Propuesta metodológica de aplicación sectorial de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la evolución ambiental de la edificación en España*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

RUBIO DEL VAL, J., 2008. Rehabilitación Urbana en España. Potencial energético de la rehabilitación y su aportación a las políticas de vivienda. *Jornada de Rehabilitación Energética*. Madrid: Ministerio de Vivienda-Instituto Cerdá, Disponible en: http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/2D73EC41-B883-4C94-8FA2-D59565EBAC6D/98653/JuanRubio_SMRUZ1.pdf.

RUBIO DEL VAL, J. y COSTA, M., 2010. Estrategias, retos y oportunidades en la rehabilitación de los polígonos de vivienda construidos en España entre 1940 y 1980. *Ciudades*, vol. 13, pp. 15-37.

RUIZ PALOMEQUE, L.G. y RUBIO DEL VAL, J., 2006. *Nuevas propuestas de rehabilitación urbana en Zaragoza. Estudio de conjuntos Urbanos de Interés*. Zaragoza: Sociedad Municipal de Rehabilitación Urbana de Zaragoza.

RUSSELL-SMITH, S. V., LEPECH, M.D., FRUCHTER, R. y MEYER, Y.B., 2015. Sustainable target value design: integrating life cycle assessment and target value design

to improve building energy and environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, vol. 88, pp. 43-51. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.03.025.

SARTORI, I. y HESTNES, a. G., 2007. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 3, pp. 249-257. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2006.07.001.

SELIGMAN, C., DARLEY, J.M. y BECKER, L.J., 1978. Behavioral approaches to residential energy conservation. *Energy and Buildings*, vol. 1, no. 3, pp. 325-337. ISSN 03787788. DOI 10.1016/0378-7788(78)90012-9.

STEEMERS, K. y YUN, G.Y., 2009. Household energy consumption: a study of the role of occupants. *Building Research & Information*, vol. 37, no. 5-6, pp. 625-637. DOI 10.1080/09613210903186661.

STEG, L., 2008. Promoting household energy conservation. *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4449-4453. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2008.09.027.

STEPHAN, A., CRAWFORD, R.H. y DE MYTTENAERE, K., 2012. Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings. *Energy and Buildings*, vol. 55, pp. 592-600. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.09.008.

STOVALL, T., PETRIE, T., KOSNY, J., CHILDS, P., ATCHLEY, J. y SISSOM, K., 2007. An Exploration of Wall Retrofit Best Practices. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X*. Clearwater Beach, FL, USA: pp. 1-10.

UNE-CEN/TR 15941, 2011. *Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Metodología para la selección y uso de datos genéricos*.

UNE-EN 15643-2, 2012. *Sostenibilidad en la construcción Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 2: Marco para la evaluación del ambiental*.

UNE-EN 15643-4, 2012. *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 4: Marco para la evaluación del comportamiento económico*.

UNE-EN 15804+A1, 2014. *Sostenibilidad en la construcción - Declaraciones ambientales de producto - Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción*.

UNE-EN 15978, 2012. *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo*.

UNE-EN 16627, 2015. *Sostenibilidad en la obras de construcción. Evaluación del comportamiento económico de los edificios. Métodos de cálculo*.

VERBEECK, G. y HENS, H., 2005. Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable? *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 7, pp. 747-754. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.10.003.

VRIJERS, J. y WASTIELS, L., 2013. Nearly Zero Energy Renovation of houses : Life cycle costs and environmental impact. En: A. PASSER, K. HÖFLER y P. MAYDL (eds.), *International Sustainable Building Conference*. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, pp. 87-94. DOI 10.3217/978-3-85125-299-6.

WALLYN, B., JEREMIE, de C., STIJNEN, L., GEORGIEV, G., NIKOLAEV, A., KARNIK, P., SARNET, A., WOUTERS, C. y ARRUFÍ, M., 2008. RESHAPE Energy performance certification and the development of renovation strategies in social housing - cross country overview. [Consulta: 26 febrero 2014]. Disponible en: <http://www.docstoc.com/docs/82146803/Reshape-WP3-cross-country-report-final-final>.

WITTSTOCK, B., GANTNER, J., SAUNDERS, K.L.T., ANDERSON, J., CARTER, C., GYETVAI, Z., KREISSI, J., LASVAUX, A.B.S., BOSDEVIGIE, B., BAZZANA, M., SCHIOPU, N., JAYR, E., NIBEL, S., CHEVALIER, J., FULLANA-I-PALMER, J.H.P., MUNDY, C.G.J.-A. y SJOSTROM, T.B.-W.C., 2012. EeBGuide Guidance Document Part B: BUILDINGS. *Operational guidance for life cycle assessment studies of the Energy-Efficient Buildings Initiative*, pp. 1-360.

YUNG, P., LAM, K.C. y YU, C., 2013. An audit of life cycle energy analyses of buildings. *Habitat International*, vol. 39, pp. 43-54. ISSN 01973975. DOI 10.1016/j.habitatint.2012.10.003.

ZABALZA BRIBIÁN, I., VALERO CAPILLA, A. y ARANDA USÓN, A., 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, vol. 46, no. 5, pp. 1133-1140. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2010.12.002.

ZABALZA, I., ARANDA, A., CARRETERO, A. y OREGI, X., 2014. Rating and Environmental Certification of Buildings in the Life Cycle Assessment Tool «SOFIAS». *World SB14 Barcelona*. Barcelona.

Capítulo 3

Propuesta metodológica de evaluación multicriterio de las soluciones de rehabilitación

A methodological approach for the multi-criteria assessment of renovation solutions

En el presente capítulo se presenta la metodología de evaluación desarrollada. Partiendo del estado de la cuestión, se ha realizado una revisión crítica de las metodologías de evaluación, con el fin de adoptar las bases metodológicas y las hipótesis de partida ya consensuadas y asentadas en la comunidad científica.

El análisis energético se plantea desde el ámbito de la simulación energética. La evaluación ambiental se realiza mediante el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) siguiendo la normativa europea y adaptando su aplicación a la rehabilitación. Se propone el uso de la valoración monetaria para facilitar posteriormente la combinación de los resultados ambientales y económicos, calculados mediante el Coste de Ciclo de Vida (CCV)

Por último, se propone la optimización multicriterio, basándose en el método de optimización de Pareto.

The proposed methodology for the assessment of renovation strategies is presented in this chapter. A critical review of the methods and tools that are currently used to evaluate housing building retrofits, enable to identify the assumptions accepted by the scientific community, in order to be integrated in the methodology.

Energy simulation is proposed for the energy assessment. Environmental evaluation is performed with Life Cycle Assessment (LCA), according to the European standard, by adapting the methodology to housing renovation. Monetary valuation is used to express, in monetary terms, environmental impacts, which enable the combination of environmental and economic results, which are calculated by Life Cycle Cost (LCC).

Finally, multi-criteria optimization is defined, on the basis of Pareto optimization method.

Publicaciones

- **POMBO, O.**, RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, vol. 123, pp. 88-100. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.137>.

3.1. Introducción

Una vez definido el alcance de la investigación y caracterizado el panorama nacional e internacional en el ámbito de la rehabilitación residencial, ha quedado patente la necesidad de aplicar el Enfoque de Ciclo de Vida a la hora de identificar qué soluciones de rehabilitación son más eficientes.

En este capítulo se quiere dar respuesta a la necesidad de armonización encontrada en la revisión del estado de la cuestión, y plantear una propuesta que integre adecuadamente los dos enfoques, ambiental y económico, con las hipótesis metodológicas adecuadas para que los resultados sean coherentes y comparables.

Previo al planteamiento metodológico para la evaluación del comportamiento ambiental y económico de las soluciones de rehabilitación, se ha considerado necesario realizar una revisión crítica de las metodologías de evaluación empleadas a nivel internacional, con el objetivo de poder determinar las hipótesis adoptadas en el ACV y CCV, y determinar los parámetros claves que deben ser incorporados en la propuesta metodológica. También, y pese a que todavía existen pocos avances en la integración de los resultados de ACV y CCV para la toma de decisiones, se han estudiado en mayor profundidad los estudios existentes, con el fin de poder incorporar en el planteamiento los enfoques que mejor se adapten a los objetivos de esta investigación.

3.2. Revisión crítica de trabajos de investigación previos

El objetivo de esta revisión es profundizar en las investigaciones desarrolladas hasta el momento, para analizar cómo se está aplicando el Enfoque de Ciclo de Vida en rehabilitación y determinar las necesidades de avance metodológico en la evaluación de la rehabilitación sostenible del parque residencial. Partiendo de los trabajos presentados en el capítulo anterior, se ha realizado un análisis comparativo en base a los criterios de evaluación definidos en el estado de la cuestión: ambiental, económico y multicriterio.

Dado que el objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología multicriterio que integre el análisis ambiental y económico desde la perspectiva del Ciclo de Vida, se han considerado únicamente aquellos estudios que adoptan este enfoque en la evaluación de las medidas de rehabilitación. A tal efecto, se han comparado y analizado las hipótesis más relevantes adoptadas en las metodologías de Ciclo de Vida, principalmente ACV y CCV: vida útil considerada en el estudio, límites del sistema, métodos de cálculo, categorías de impacto y unidades, entre otros. Por último, se han analizado distintos métodos de combinación de las metodologías de ciclo de vida para evaluar la sostenibilidad, con el fin de encontrar características comunes e inconsistencias entre ellas.

3.2.1. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La Tabla 3.1 describe las principales hipótesis adoptadas en la evaluación ambiental de la rehabilitación de viviendas. No se ha incluido la unidad funcional, puesto que sólo se describe en cuatro estudios. Cabe señalar que en la selección de la unidad funcional se aprecia una disparidad de criterios. Nemry et al. (2010) definían la unidad funcional como “el uso de 1 m² de superficie útil de vivienda durante el periodo de un año”. La unidad funcional elegida por Beccali et al. (2013) ha sido el edificio evaluado. De Angelis et al. (2013) la han especificado como “1 m² de superficie útil”. Por último, Assiego de Larriva et al. (2014) la han descrito como la energía necesaria (MJ) para asegurar las condiciones de confort en el interior de las viviendas durante un año”.

Las vidas útiles consideradas difieren entre 20 y 60 años, siendo 50 años la más representativa. Los límites del sistema adoptados en la mayoría de los casos son “de la cuna a la tumba”. Donde mayor variedad de hipótesis se ha encontrado es en selección de las categorías de impacto que son consideradas. El potencial de calentamiento global (GWP) se evalúa en el 33% de los casos analizados, seguido de la demanda energética acumulativa (CED), el potencial de acidificación (AP), y el potencial de eutrofización (EP).

Tabla 3.1. Información considerada en al ACV de la rehabilitación de viviendas. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Referencia	País	Vida útil	Límites del sistema	Método de cálculo	Categorías de impacto	Unidades
Verbeek and Hens (2005) ¹	Bélgica	30	De la cuna a la tumba	Inventario de ciclo de vida	Consumo de energía primaria	kWh/año
Dodoo et al. (2010)	Suecia	50	De la cuna a la tumba		Emisiones de CO ₂	ton/año
Nemry et al. (2010) ¹	UE-25	40	De la cuna a la tumba	CML 2001	Uso de energía primaria	kWh/m ²
					Energía primaria (PE)	MJ/m ² a
					Potencial de Acidificación (AP)	%
					Potencial de Eutrofización (EP)	%
					Potencial de Calentamiento (GWP)	kg CO ₂ eq/m ² a - %
					Potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP)	%
					Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos (POCP)	%
Ouyang et al. (2011b)	China	20	Construcción + Fase de uso	ACV-CO ₂ simple	Ahorros energéticos anuales	kWh/a & kWh/(m ² a)
Bin and Parker (2012)	Canadá	50	De la cuna a la tumba	Huella de carbono	Reducción de emisiones de CO ₂	kg CO ₂
					Energía embebida (EE)	kWh
					Carbono embebido (EC)	kg CO ₂ e
					Huella ecológica (EF)	gha
Beccali et al. (2013)	Italia	50	De la cuna a la tumba	Método de energía acumulada (CED)	Valor de energía acumulada (CED)	GJ
					Potencial de Calentamiento (GWP)	kg CO ₂ eq
					Potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP)	kg CFC ₁₁ eq
					Potencial de Acidificación (AP)	kg SO ₂ eq
					Potencial de Eutrofización (EP)	kg PO ₄ ³⁻ eq
					Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos (POCP)	kg C ₂ H ₄ eq
Vrijders y Wastiels (2013) ¹	Bélgica	60	Construcción + Fase de uso	ReCiPe Endpoint (H) / Europe ReCiPe H/A	Pts (ReCiPe)	Pts
De Angelis et al. (2013) ¹	Italia	50	Fase de uso		Valor de energía acumulada (CED)	MJ/m ²
Ostermeyer (2013) ¹	Francia	30		ReCiPe H/A	Potencial de Calentamiento (GWP)	kg CO ₂ eq/m ²
					IPPC 100	
					CED	
Assiego de Larriva et al. (2014)	España	20 ²	De la puerta a la tumba	Método de energía acumulada (CED)	Requisito de energía bruta (GER)	MJ/FU
Antipova et al. (2014) ¹	Portugal		De la cuna a la puerta	CML 2001	Potencial de Calentamiento (GWP)	kg CO ₂ -Eq
					Cambio climático	kg 1,4-DCB-eq
					Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-eq
					Toxicidad acuática	kg 1,4-DCB-eq
					Toxicidad terrestre	kg 1,4-DCB-eq
					Potencial de Acidificación (AP)	kg NOx-eq
					Potencial de Eutrofización (EP)	kg SO ₂ -eq
Celiner y Edis (2014) ¹	Turquía	50	De la cuna a la tumba	NR _i =(NI-NI) ² x100/NI _i	Eco-indicador (eco-punto)	Eco-puntos (NI)

NR: comportamiento ambiental; NI: impactos ambientales; i: tipo de edificio; j: alternativas de rehabilitación.

¹ Estudios que consideran el ACV como parte de la evaluación multicriterio.

² La vida útil considerada para el edificio es de 50 años. Se construyó en 1983 y la rehabilitación se llevó a cabo en 2013. La vida útil restante es de 20 años.

3.2.2. Coste de Ciclo de Vida (CCV)

La Tabla 3.2 resume las consideraciones principales adoptadas en el análisis del CCV en las inversiones de rehabilitación energética. Respecto a los métodos de cálculo, el valor actual neto (VAN) fue adoptado en el 56% de los estudios revisados, seguido del periodo de amortización (31%), y la tasa de retorno interna (25%). Cabe destacar que el VAN es el método más habitual en el análisis del CCV, si bien existen otros métodos, como el periodo de retorno de la inversión, el ahorro neto, el ratio ahorro-inversión, el ratio interno de retorno, y el coste anual o coste anual equivalente (ISO 15686-5, 2008).

En los estudios de CCV raramente se considera la evaluación “de la cuna a la tumba”. Normalmente se realizan desde la perspectiva del que toma las decisiones económicas (p. ej. fabricante, consumidor, cadena de suministro) (Dhillon, 1989). En consecuencia, los estudios de CCV se centran principalmente en las fases del ciclo de vida donde los efectos relevantes, desde la perspectiva de la persona que toma las decisiones, ocurren. Esto se refleja claramente en la información presentada en la Tabla 3.2.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la vida útil considerada en el CCV puede alterar significativamente los resultados económicos (Aktas y Bilec, 2012; Mequignon et al., 2013). Moore y Morrissey (2014) descubrieron mediante un análisis de sensibilidad que, ampliando la vida útil de 40 años (periodo considerado actualmente en Australia) a 80 años, los beneficios económicos se multiplicaban por seis. Por otro lado, en este tipo de evaluaciones donde la vida útil considerada representa un largo periodo de tiempo (desde 30 a 100 años, o superior), el plazo de los flujos de costes y beneficios es adquiere una mayor significación. En este sentido, el uso del descuento es una técnica habitual que permite reflejar este efecto. El tiempo del valor del dinero – expresado como tasa de descuento– depende de la inflación, el coste del capital, las oportunidades de inversión y las preferencias de consumo del personal (Pike y Dobbins, 1986; Perkins, 1994; Kirk y Dell’Isola, 1995). Frecuentemente se ha criticado la selección de una tasa de descuento apropiada para el análisis del CCV (Moore y Morrissey, 2014). Hasan et al. (2008) descubrieron, mediante un análisis de sensibilidad, que la clasificación de las mejores soluciones de rehabilitación que ellos habían establecido era válida para una tasa de interés real del 4%. Pero si esta tasa era mayor, la mejor solución que ellos habían determinado ya no resultaba viable.

Tabla 3.2. Información considerada en el CCV de la rehabilitación de edificios residenciales. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Referencia	País	Vida útil	Límites del sistema	Categorías de impacto	Tasa de interés real	Tasa de interés nominal	Tasa de inflación	Crecimiento del precio de la energía	Instrumentos de política energética
Gorgolewski (1995)	Reino unido	30	Inversión + fase de uso	SIR: Beneficio neto (£) Beneficio neto acumulado (£) Período de amortización (años) SIR	4%	-	-	0%	No se considera
Papadopoulos (2002)	Grecia	50	Inversión + fase de uso		6%	-	-	Análisis de sensibilidad cubriendo rangos de 40% de variación	No se considera
Gaterell and McEvoy (2005b)	Reino unido	47	Inversión + fase de uso	RCB	6%	-	-		No se considera
Verbeek y Hens (2005) ¹	Bélgica	30	Inversión + fase de uso	Inversión (£) Coste energético anual (£/año) Valor actual neto total (£) Período de retorno (año) Inversión/ton CO ₂ anuales evitadas	5%	-	0%	2%	No se considera
Amstalden et al. (2007)	Suiza	40	Inversión + fase de uso	VAN TIR PBP	3,5%	-	-	4 escenarios de precio futuro 4 escenarios de desarrollo dinámico 1.5% and 2.5% por año.	Subsidios Deducciones fiscales Impuestos de carbono
Hasan et al. (2008)	Finlandia	20: 50	Inversión + fase de uso	dCCV (£): dOC (£) dIC+dRC (£)	4,90%; 2,94%	7%; 5%	2%	1%; 5%	No se considera
Nemry et al. (2010) ¹	UE-25	40	Inversión + fase de uso	VAN TIR	4%	-	-	2%	No se considera
Ouyang et al. (2011a)	China	40	Inversión + fase de uso	VAN TIR		6%	3%	Ahorros energéticos anuales: 2%	No se considera
Byman et al. (2012)	Suecia	50	Inversión + fase de uso	VAN	5%	-	-	Precio de la electricidad: 2%	No se considera
Brown et al. (2013) ¹	Suecia	50	Inversión + fase de uso	CCV	4,25%; 5%	-	1,2%	4%; Electricidad: 2%; District heating: 1,4%; 0%	No se considera
Desogus et al. (2013)	Italia	30	Inversión + fase de uso	TIR VAN PBT	5%	-	-		Financiación pública del 55% durante los 10 primeros años Ayudas económicas
Risholt et al. (2013) ¹	Noruega	30	Inversión + fase de uso	CCV(VAN) PBT	4%	-	2%	5%	
Vrijders y Wastiels (2013) ¹	Bélgica	30	Inversión + fase de uso	Coste de inversión (£) VAN (£)	1,96%	-	-	2,25%	Se considera la influencia de ayudas
De Angelis et al. (2013) ¹	Italia	50	Inversión + fase de uso + demolición	Coste	0%	-	-	0%	No se considera
Ostermeyer (2013) ¹	Francia	30	Inversión + fase de uso	CCV _{TFA}	5%	-	2%	5%	No se considera
Celiner y Edis (2014) ¹	Turquía	50	Inversión + fase de uso	CR, CI	6,71%	-	-	0%	No se considera

SIR: ratio ahorro-inversión (Savings-to-Investment Ratio); VAN: Valor Actual Neto; RCB: Ratio Beneficio-Coste; TIR: tasa interna de retorno; dCCV: diferencia en el coste de ciclo de vida; dOC: diferencia en el coste de energía operacional; dIC+dRC: diferencia en el coste de inversión y sustitución; TFA: superficie de la zona trata; CR: comportamiento económico; CI: impacto económico.

¹ Estudios que consideran el CCV como parte de la evaluación multicriterio.

Las hipótesis relativas al precio futuro de la energía afectarán de manera notable a los resultados de la evaluación. Los inversores asumen frecuentemente que el precio medio de la energía se mantiene constante durante el periodo de amortización de la inversión y que los precios pasados pueden ser empleados para predecir precios futuros. Sin embargo, dada la creciente demanda energética global y es escenario de futura escasez de recursos no renovables, el suministro de combustibles fósiles a bajo coste parece estar llegando a su fin, esta especulación optimista ha dejado de ser económicamente sólida (Campbell, 2002; Greene et al., 2006; IEA, 2004).

En los trabajos analizados, el incremento del precio de la energía difiere entre un 1% y un 5%. Papadopoulos (2002) proponía un análisis de sensibilidad, cubriendo un rango de variación del 40%, mientras que Amstalden et al. (2007) analizaban cuatro escenarios para cubrir los precios futuros de combustible y cuatro escenarios adicionales que asumían un desarrollo dinámico del precio del fuel. Junto a los costes actuales de instalación, la rentabilidad desde la perspectiva del inversor está influenciada por otros factores como las posibles ayudas recibidas, la deducción de impuestos -que se han ofertado en muchos países- o las tasas aplicables en el uso de la energía o emisiones de CO₂.

Otro parámetro a tener en consideración, es el precio que van a tener en el futuro las medidas de eficiencia energética. En el transcurso de la aplicación de una nueva tecnología, el precio de dicha tecnología suele disminuir, debido a las economías de escala y a los efectos del aprendizaje en la fabricación. Esto se describe comúnmente mediante el concepto de la curva de experiencia (IEA, 2000; Jakob y Madlener, 2004). Jakob et al. (2002) estimaron el potencial de disminución del coste de las medidas de eficiencia energética en edificios investigando las curvas de disminución de precios del pasado. En su análisis, incluyeron el potencial del progreso tecnológico, la extensión de la aplicación en el futuro de medidas de eficiencia energética, y las hipótesis sobre los costes futuros de mano de obra y energía.

3.2.3. Optimización ambiental y económica

En la presente revisión, se han encontrado ciertas inconsistencias en la aplicación de ACV y CCV para la evaluación del comportamiento de las soluciones de rehabilitación. Los límites del sistema considerados son difieren entre los diferentes estudios (Cetiner y Edis, 2014; Nemry et al., 2010). En concreto, mientras que en los estudios de ACV se utiliza una clasificación “de la cuna a la tumba”, en los estudios de CCV se consideran únicamente los costes de inversión y los costes de la fase de uso. La Tabla 3.3 presenta diferentes formas de combinar el ACV y CCV para optimizar el comportamiento energético de las viviendas. Se ha incluido el trabajo de Allacker y De Troyer (2013), que

desarrollaron una metodología interesante para optimizar las tipologías residenciales en Bélgica.

Tabla 3.3. Optimización ambiental y económica de las estrategias de eficiencia energética en edificios residenciales. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016).

Referencia	País	Vida útil	Impactos ambientales	Impactos económicos	Método de optimización
Allacker and De Troyer (2013)	Bélgica	60	Costes externos (€/m ²) Costes externos iniciales (€/m ²)	CCV (€/m ²) Coste de inversión (€/m ²)	Método de Pareto
De Angelis et al. (2013) ¹	Italia	50	Valor acumulativo de energía (MJ/ m ²) Emisiones CO ₂ eq (kgCO ₂ eq/m ²)	CCV (€/m ²)	Método de clasificación por pares
Ostermeyer (2013) ¹	Francia	30	ReCiPe (%) CED (%) IPCC (%)	CCV (%)	Método de Pareto
Cetiner y Edis (2014) ¹	Turquía	50	NR	CR	Método de ponderación

NR: comportamiento ambiental; CR: comportamiento económico

para el sector de la construcción que permite estimar el CCV y el ACV, integrando los resultados (LCC+A). El programa posibilita proponer ciclos de vida alternativos, en fase de proyecto, y diferentes escenarios para su implantación durante la vida útil. Se emplea un método probabilístico, capaz de recoger la probabilidad de cambio en factores como el coste o la durabilidad. El análisis de resultados se basa en un esquema bidimensional de “ecoportfolio”, que sitúa en un eje los resultados económicos y en el otro los resultados ambientales, analizando cada categoría de impacto de manera separada. Con el fin de poder comparar los resultados económicos con más de una categoría ambiental simultáneamente, se ha definido el término Factor de Impacto Ambiental (EIF, por sus siglas en inglés), que se obtiene tras la ponderación de las diferentes categorías de impacto. Esta ponderación la define el usuario de la herramienta en función de lo que la evaluación deba ilustrar, estimando el porcentaje relativo que representa cada categoría, lo que resta objetividad y dificulta notablemente la comparabilidad de resultados, dado que dicha ponderación puede ser distinta en cada evaluación realizada.

La idea de la sostenibilidad, definida como un enfoque de triple balance y sus tres de dimensiones, no está todavía visible en el sector de la construcción (Ostermeyer et al., 2013; Dreyer et al., 2006; Kaatz et al., 2006; Reitinger et al., 2011). A pesar de que algunas investigaciones ya combinan el ACV y CCV, ninguna de ellas considera el Análisis de Ciclo de Vida Social (ACVS). Esto es debido al todavía incipiente desarrollo de la metodología de evaluación de aspectos sociales aplicada a la edificación y a su dificultad de implementación (Kloepffer, 2008).

3.2.4. Conclusiones y perspectivas futuras

La revisión bibliográfica ha revelado que gran parte de las estrategias de rehabilitación, que están siendo aplicadas a nivel internacional, resultan bastante similares. Los resultados mostraron que el aislamiento de la envolvente, los cambios de ventanas y el sellado de infiltraciones son las estrategias más comunes. Sin embargo, esto no implica que la selección del material y espesor de aislamiento más adecuado para cierto elemento, como por ejemplo la fachada, sería la misma si se empleasen distintas metodologías de evaluación para identificar la solución óptima.

Cuando se reduce la demanda energética del edificio debido a la rehabilitación, la importancia de la contribución de los materiales aumenta. Adicionalmente, cabe precisar que una gran reducción de consumo energético no siempre es rentable desde el punto de vista económico (Byman y Jernelius, 2012). El ACV y CCV deberían utilizarse para identificar las soluciones más adecuadas desde el punto de vista ambiental y económico. Por ello, la presente investigación pretende dar respuesta a la necesidad identificada. Para el desarrollo de la metodología se han adoptado las hipótesis ya consensuadas tanto en la evaluación ambiental, como en la económica y en la combinación de ambas.

Las discrepancias encontradas al combinar el ACV y CCV parecen no ser problemáticas. Los límites del sistema, así como el equivalente funcional, deben definirse de la misma forma, ya que son elementos comunes. Asimismo, los análisis de sensibilidad son necesarios con el fin de reducir incertidumbres y visualizar la variación de resultados a medida que se producen variaciones en las hipótesis consideradas.

Una limitación encontrada en esta revisión es la manera de ponderar y normalizar los impactos ambientales para llegar a una puntuación única, combinable fácilmente con los resultados económicos. Una multiplicidad de puntuaciones de impactos individuales raramente es una buena base para la toma de decisiones. A pesar de que el grupo de trabajo CEN-TC/350 ha definido los indicadores de impacto ambiental más apropiados tanto a nivel de producto como de edificio (UNE-EN 15978, 2012; UNE-EN 15804+A1, 2014), hace falta seguir trabajando en la aplicación de un método de agregación integrado y transparente. Esto es de vital importancia para avanzar hacia una evaluación comprensiva de la sostenibilidad de ciclo de vida.

Por último, la dimensión social requiere todavía un sustancial desarrollo para poder ser aplicada, y ninguna de las investigaciones que han sido analizadas incorpora el ACVS para la evaluación de los aspectos sociales. Si bien es importante insistir en la necesidad de incorporar este pilar en una metodología multicriterio para la evaluación global de sostenibilidad, dado el escaso grado de avance metodológico, los aspectos sociales han

quedado fuera del alcance de esta tesis. No obstante, su inclusión deberá considerarse en un futuro.

3.3. Planteamiento metodológico para el análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación de viviendas

En la revisión crítica realizada ha quedado patente la necesidad de avanzar en la combinación del ACV y CCV para evaluar el potencial real de mejora de las estrategias de rehabilitación así como identificar las soluciones más adecuadas. Dado que actualmente a nivel nacional tan sólo se considera el comportamiento energético y las emisiones de CO₂ debidas al uso de climatización del edificio durante la fase de uso, el comportamiento energético se evalúa de manera independiente. Si bien cabe precisar que, como se observa en la Figura 3.1, los resultados de la evaluación energética, es decir el consumo de climatización, se incorporarán en el inventario del ACV y CCV.

Figura 3.1. Esquema del planteamiento metodológico para la evaluación multicriterio de las estrategias de rehabilitación. Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, y con el fin de evitar inconsistencias, es necesario definir el objetivo y alcance de la evaluación.

3.3.1. Definición del objetivo y alcance

El objetivo de la metodología que se ha desarrollado es evaluar para distintas estrategias de rehabilitación el comportamiento energético, ambiental y económico, permitiendo un análisis comparativo mediante una optimización multicriterio. Dado que las estrategias de rehabilitación se pueden aplicar sobre distintos elementos de la envolvente, y se busca la rehabilitación integral, se propone un análisis a nivel de edificio. Si se quisieran comparar dos fachadas, se podría realizar la evaluación a nivel de elemento, adaptando la metodología a dicho nivel.

3.3.1.1. Equivalente funcional

La metodología propuesta en esta investigación tiene como prioridad la evaluación de la rehabilitación a nivel de edificio. El equivalente funcional (UNE-EN 15978, 2012), que constituye la base para el análisis comparativo, se ha definido como "1 m² de un edificio residencial situado en un contexto geográfico o climático determinado, en un año o periodo específico, y con una vida útil determinada" (p. ej. 1 m² de superficie útil de vivienda en un bloque de viviendas situado en Madrid, en el año 2014 y con una vida útil de 50 años). Si bien según la norma europea el contexto climático no es un elemento obligatorio a incluir en el equivalente funcional, queda incluido en la metodología propuesta por tratarse de un parámetro relevante para garantizar la comparabilidad de los resultados obtenidos, dado que condiciona fuertemente los consumos operacionales de acondicionamiento térmico (Rivela, 2012).

La ventaja de trabajar a nivel de edificio en rehabilitación, es que es posible evaluar de manera global distintas estrategias de actuación. Esto es importante, porque el ahorro energético en un edificio debido a la rehabilitación de fachada y de cubierta, no se corresponde con la suma de los ahorros debidos a la rehabilitación de la fachada y los ahorros debido a la rehabilitación de la cubierta.

3.3.1.2. Periodo de estudio de referencia

El valor por defecto del periodo de estudio de referencia debe ser la vida útil requerida del edificio. Tal y como se ha observado en la revisión crítica de los trabajos de investigación, la vida útil considerada oscilaba entre 20 y 60 años, siendo 50 años el valor más representativo. En España, la ORDEN ECO 805/2003 establece la vida útil de los edificios residenciales (para inversiones inmobiliarias) en 100 años. Al rehabilitar un edificio, la vida útil considerada será menor de 100 años, puesto que el edificio lleva construido un largo periodo de tiempo. Por tanto, se ha considerado adecuada la selección de una vida útil de 50 años.

3.3.1.3. Limite del sistema

Al hilo de los resultados obtenidos en la revisión metodológica se plantea que, tanto en análisis ambiental como económico, el estudio se realice "de la cuna a la tumba". La propuesta que se plantea tiene como objetivo poder realizar un análisis comparativo de distintas estrategias de rehabilitación, con el fin de identificar la que presente un mejor comportamiento ambiental y económico. Por ello, y dado que el edificio de actuación es el mismo, los límites del sistema parten de la rehabilitación energética al fin de vida, sin considerar el inventariado de materiales del edificio preexistente (Figura 3.2).

Figura 3.2. Límites del sistema definidos para la evaluación del comportamiento ambiental y económico de las estrategias de rehabilitación. Fuente: elaboración propia.

La Figura 3.3 muestra la estructura en módulos del ciclo de vida de la edificación conforme a la normativa europea (UNE-EN 15643-3, 2012; UNE-EN 15978, 2012). Cuando se acomete una rehabilitación con mejora de la eficiencia energética de un edificio, se trata de una rehabilitación no considerada cuando se construyó dicho edificio. En estos casos, la rehabilitación no se incluye en el módulo B5, sino que comienza un nuevo ciclo constructivo, de modo que los impactos ambientales y económicos de los materiales de la rehabilitación y de los procesos de construcción se asignan a los módulos A1-A5. La Norma UNE-EN 15978 recoge los procesos que deben considerarse en cada uno de los módulos.

Figura 3.3. Etapas del ciclo de vida. Fuente: adaptado de UNE-EN 15643-2:21012.

Tal y como se observa en la Figura 3.3, los componentes para la reutilización y los materiales para reciclaje y valorización energética se consideran recursos potenciales para futuros usos, quedando fuera del ciclo de vida del edificio. Quedan recogidos en el módulo D, que cuantifica los beneficios y cargas ambientales netas obtenidas de la reutilización, reciclaje, valorización energética de los flujos netos de materiales y energía exportados que salen del límite del sistema.

En la evaluación económica, la norma europea (UNE-EN 16627, 2015) ha añadido el módulo el A0 previo a las etapas de producto y proceso de construcción (Figura 3.4), que normalmente en el ámbito económico se dan de forma agregada. Este módulo (A0) recoge los costes previos al comienzo de las obras de rehabilitación, como pueden ser los costes del proyecto o las subvenciones, entre otros.

Figura 3.4. Exposición de información modular para las diferentes etapas de la evaluación de edificios. Fuente: UNE-EN 16627:2015.

3.3.2. Inventario del ciclo de vida (ICV)

3.3.2.1. Cuantificación

La cuantificación de todos los materiales y productos se determina en base a la descripción diseñada del objetivo de la evaluación. Esto es importante, dado que cuando se trabaja a nivel de edificio se debe calcular el ratio de la envolvente por unidad funcional.

3.3.2.2. Selección de los datos

Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) proporcionan los resultados de ACV de los productos y servicios para su uso en la evaluación del comportamiento ambiental del edificio. En los últimos años se están realizando esfuerzos para que las empresas publiquen las DAP de sus productos. No obstante, al realizar la presente investigación se ha observado que la disponibilidad de las DAP es todavía escasa.

Puesto que no se dispone de un abanico suficientemente amplio de datos representativos específicamente del contexto español, en la presente investigación se ha

optado por seleccionar la base de datos de Ecoinvent, versión 2.2 (Ecoinvent Centre, 2010), base de datos más utilizada a nivel europeo. Conforme se ha podido constatar de las investigaciones previas analizadas, esta base de datos presenta las siguientes ventajas:

- Su uso generalizado en las investigaciones científicas nacionales y europeas (Allacker y Troyer, 2012; Ortiz-Rodríguez et al., 2010; Cellura et al., 2013a; Zabalza et al., 2013; Rivela, 2012; Fouquet et al., 2015).
- Dispone de datos de inventario de aproximadamente 4.100 procesos, entre los que existe una amplia gama de materiales de construcción.
- Existen informes descriptivos de las características generales de los datos de inventario, disponibles para todos los procesos de la base de datos.
- Se actualiza con cierta regularidad.
- Dispone de los datos para los países de Europa Occidental y para España; si bien la base de datos de Ecoinvent contiene principalmente datos representativos de Europa Occidental y Suiza, recoge adicionalmente algunos procesos específicos para el contexto español.

3.3.3. Evaluación del comportamiento energético

3.3.3.1. Evaluación del comportamiento energético durante la vida útil

La reducción del consumo energético es un parámetro clave en la rehabilitación de viviendas. Algunas normativas y estándares existentes limitan la demanda energética con el fin de mejorar la eficiencia de los edificios. Así, el CTE, que ya es aplicable a la rehabilitación de viviendas, establece la demanda límite de calefacción y refrigeración que debe cumplir un edificio cuando se actúa en más del 25% de la envolvente. El estándar Passivhaus, a su vez, limita la demanda energética durante la fase de uso, así como las infiltraciones máximas, asegurando la estanquidad de la envolvente.

Tal y como ha quedado recogido en el estado de la cuestión, el uso de herramientas informáticas para la evaluación del comportamiento energético está muy estandarizado (Assiego de Larriva et al., 2014, Beccali et al., 2013, Bin y Parker, 2012, Buratti et al., 2014, Gaterell and McEvoy, 2005a, Ouyang et al., 2011b, Paiho et al., 2013, Stovall et al., 2007). En la presente investigación, se ha optado por EnergyPlus, herramienta informática muy extendida para la simulación dinámica del comportamiento térmico del edificio (Aste et al., 2009; Ballarini y Corrado, 2012; Buratti et al., 2013). Es aconsejable, si se dispone de datos bien de monitorización, bien de facturas energéticas, comprobar los valores de simulación con los valores reales, con el fin de poder calibrar el modelo de simulación, dado que son varios los autores que destacan la influencia del usuario en los

resultados energéticos (Guerra Santin et al., 2009; Guerra-Santin e Itard, 2010; Mullaly, 1998; Owens y Wilhite, 1988; Seligman et al., 1978; Steg, 2008), habiendo obtenido un consumo real menor al previsto en las simulaciones (Galvin y Sunikka-Blank, 2013; Peuportier et al., 2013; Ben y Steemers, 2014; Steemers y Yun, 2009).

Por ello, es necesario definir adecuadamente el perfil de uso. Si no se dispone de esta información, el Código Técnico, en su versión de 2013, define los perfiles de uso normalizados (Tabla 3.4) de los edificios (solicitaciones interiores) en función de su uso, densidad de las fuentes internas y periodo de utilización.

Tabla 3.4. Perfiles de uso normalizado para edificios residenciales. Fuente: CTE DB-HE1, Apéndice C.

USO RESIDENCIAL	(24h, BAJA)				
	1-7	8	9-15	16-23	24
Temperatura Consigna Alta (°C)					
Enero a Mayo	-	-	-	-	-
Junio a Septiembre	27	-	-	25	27
Octubre a Diciembre	-	-	-	-	-
Temperatura Consigna Baja (°C)					
Enero a Mayo	17	20	20	20	17
Junio a Septiembre	-	-	-	-	-
Octubre a Diciembre	17	20	20	20	17
Ocupación sensible (W/m ²)					
Laboral	2,15	0,54	0,54	1,08	2,15
Sábado y Festivo	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Ocupación latente (W/m ²)					
Laboral	1,36	0,34	0,34	0,68	1,36
Sábado y Festivo	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
Iluminación (W/m ²)					
Laboral, Sábado y Festivo	0,44	1,32	1,32	1,32	1,22
Equipos (W/m ²)					
Laboral, Sábado y Festivo	0,44	1,32	1,32	1,32	1,22
Ventilación verano ¹					
Laboral, Sábado y Festivo	4,00	4,00	*	*	*
Ventilación invierno ²					
Laboral, Sábado y Festivo	*	*	*	*	*

¹ En régimen de verano, durante el periodo comprendido entre la 1 y las 8 horas, ambas incluidas, se supondrá que los espacios habitables de los edificios destinados a vivienda presentan una infiltración originada por la apertura de ventanas de 4 renovaciones por hora. El resto del tiempo, indicados con * en la tabla, el número de renovaciones hora será constante e igual al mínimo exigido por el DB.

² El número de renovaciones hora, indicado con * en la tabla, será constante e igual al calculado mínimo exigido por el DB HS.

Otro parámetro que se ha detectado que tiene gran influencia en el resultado de las simulaciones es la tasa de infiltración, que se define como la entrada involuntaria de aire del exterior que penetra en el edificio debido a la presión dinámica del viento (IDAE, 2012). La infiltración depende en principio de muchos factores, entre los que pueden mencionarse las condiciones climáticas (principalmente la velocidad del viento, que

influye en la sobrepresión o depresión creada en diferentes fachadas), el entorno urbano circundante (que puede modificar la velocidad y dirección del viento), la geometría del edificio, el tamaño, la posición y la permeabilidad de las rendijas y aberturas por las que penetra el aire, y el tiro térmico natural o forzado que se pueda producir en el interior del edificio (IDAE, 2009b).

Figura 3.5. Ensayo *Blower Door*: un ventilador colocado en la puerta principal del inmueble despresuriza el interior del mismo. Los flujos de aire exteriores entran en el edificio por cualquier filtración. Fuente: www.isocell.at.

Conocer cuál es la tasa de infiltración del edificio no es una tarea sencilla. El método más utilizado a nivel mundial para analizar y controlar el nivel de infiltraciones de un edificio, es el de presurización por medio de ventilador, más conocido como el ensayo “Blower Door” (Figura 3.5), cuya ejecución se regula mediante la norma UNE-EN 13829. Si no es posible realizar dicho ensayo, el Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3 (IDAE, 2012) establece que, si las ventanas no se han rehabilitado, el caudal de infiltraciones se tomaría de la siguiente tabla en función de la antigüedad de la construcción:

Tabla 3.5. Caudal de infiltraciones (m³/h) para un salto de presiones de 4 Pa. Fuente: adaptado del Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3 (2012, p. 75).

	Viviendas unifamiliares	Bloques de viviendas
Año de construcción	Caudal de infiltración (m ³ /h)	Caudal de infiltración (m ³ /h)
< 1960	7,4 · v	5,5 · v
1961 - 1975	5,5 · v	3,6 · v
1976 - 1988	3,6 · v	2,2 · v
> 1989	2,2 · v	2,2 · v

v: volumen.

Cuando se evalúa la rehabilitación de un edificio, se mejora la envolvente y se reducen las infiltraciones, por lo que resulta muy difícil estimar el parámetro real después de la rehabilitación. El documento “Condiciones de aceptación de Procedimientos alternativos a LIDER y CALENER” (IDAE, 2009b), proporciona unos valores por defecto entre los que se encuentra la permeabilidad a 1 Pa, donde se proporciona la tasa de los componentes de la envolvente según el tipo de edificio (IDAE, 2009b, p. 38):

- Espacios habitables de edificios de viviendas unifamiliares: 0,30 ren/h.
- Espacios habitables en bloques de viviendas: 0,24 ren/h.
- Espacios habitables en edificios de otros usos: 0,10 ren/h.

En España no existe normativa de obligado cumplimiento respecto al nivel de estanquidad de los edificios de viviendas. En la última actualización del Código Técnico de Edificación (CTE), en su Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) de 2013, se indica que para calcular la demanda energética de los edificios se deberán considerar las pérdidas por ventilación e infiltraciones no deseadas, pero no se establece ningún límite.

No obstante, en el manual de referencia de Calener GT (IDAE, 2009a, p. 102), programa acreditado para la calificación energética de edificios, se hace referencia al estándar prEN 13790:1999 donde se definen los siguientes niveles de estanquidad en función del tipo de edificio, en renovaciones a la hora a 50 Pa de presión (n50):

Tabla 3.6. Valor de n50 (1/h) para los diferentes niveles de estanquidad. Fuente: anexo F del estándar prEN ISO 13790:1999.

Nivel de estanquidad del edificio	Viviendas unifamiliares	Viviendas plurifamiliares
Superior	< 4	< 2
Medio	4 – 10	2 – 5
Inferior	> 10	> 5

3.3.3.2. Evaluación del comportamiento energético del ciclo de vida

El comportamiento energético de un edificio debe ser considerado a lo largo del ciclo de vida completo del edificio, considerando además de la energía operacional -cuyo cálculo se ha descrito en el apartado anterior- la energía embebida de los materiales que han sido empleados en la acción de rehabilitación. Dicho de otro modo, es necesario aplicar el Enfoque de Ciclo de Vida para evaluar el comportamiento energético global, calculando la energía total involucrada.

En relación a la energía involucrada en las etapas previas a la puesta en obra, denominada energía embebida, existe un extenso debate sobre cómo debe realizarse su cálculo (Dixit et al., 2012, 2010), debido a la ausencia de una metodología estandarizada que permita estimar el nivel energético de los materiales de construcción (Khasreen et al., 2009; Langston y Langston, 2008; Menzies et al., 2007). En la presente investigación se ha optado por el método de cálculo *Cumulative Energy Demand* (CED), extensamente aplicado en la evaluación de la rehabilitación residencial (Beccali et al., 2013; De Angelis et al., 2013; Ostermeyer et al., 2013). Los cálculos se han realizado utilizando la herramienta informática SimaPro 7.3.3.

La calidad de los datos existentes relativos a la energía embebida de los materiales está ampliamente cuestionada en la literatura existente (Dixit et al., 2012, 2010 ; Crawford, 2009; Stephan et al., 2012). Tal y como se ha mencionado anteriormente, en el escenario español no se dispone de un abanico suficientemente amplio de datos relativos a los materiales de construcción, si bien cabe mencionar el esfuerzo realizado en los últimos años por desarrollar bases de datos adaptadas al contexto español, entre las que se encuentran las bases de datos de BEDEC y OpenDAP, así como los sistemas DAPc y Global EPD.

En la presente investigación se ha optado por la base de datos de Ecoinvent, versión 2.2 (2010), ya que se trata de una base de datos general, transparente y muy utilizada a nivel Europeo. En el caso de la energía relativa al uso operacional del edificio se ha considerado recomendable utilizar los factores de conversión de energía final a energía primaria definidos para el contexto español y publicados por el IDAE (2014).

La presente investigación persigue ilustrar la metodología de evaluación multicriterio desarrollada y, mediante la selección de casos de estudio considerados representativos de determinadas actuaciones de rehabilitación, tratar de contribuir al debate sobre la adecuación de las estrategias contempladas actualmente, fruto de los programas de ayuda a la rehabilitación implementados por diferentes administraciones públicas.

3.3.4. Evaluación del comportamiento ambiental

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es la metodología de referencia para la evaluación del comportamiento ambiental de productos, procesos y servicios. Se trata de una metodología que permite sistematizar la adquisición y generación de información y objetiviza las decisiones a tomar hacia un deseable desarrollo sostenible. En los últimos años, el Comité de Normalización Europeo CEN/TC 350 ha hecho una gran labor de armonización, dando pautas para la evaluación del ACV en edificios (UNE-EN 15978,

2012) y productos de la construcción (UNE-EN 15804+A1, 2014) sobre los métodos de cálculo, impactos ambientales más adecuados, factores de caracterización, etc.

En esta investigación se han adoptado las reglas de cálculo establecidas por el Comité de Normalización Europeo CEN, con el objetivo de evaluar el comportamiento ambiental de las soluciones de rehabilitación. Por ello, este apartado se centra únicamente en la descripción de los aspectos más relevantes y las hipótesis asumidas para la evaluación de las estrategias de rehabilitación, estando la descripción general de la metodología para la evaluación del comportamiento ambiental de los edificios recogida en el cuerpo normativo anteriormente referido.

3.3.4.1. Evaluación de impacto ambiental de ciclo de vida (EIACV)

La evaluación de impacto es el proceso técnico para la caracterización y el análisis de las cargas ambientales identificadas en el inventario (Consoli, 1993). La etapa de evaluación de impacto tiene como misión interpretar los resultados obtenidos en el inventario, indicando la capacidad de distorsionar el medio ambiente del producto o actividad en las diversas categorías de impacto, previamente seleccionadas por el evaluador. El EIACV se divide en cinco etapas, de las cuales las tres primeras son obligatorias, mientras que las dos últimas son opcionales:

1. **Selección** de las categorías de impacto: se seleccionan las categorías de impacto a analizar, p. ej. potencial de calentamiento global, potencial de acidificación, etc.
2. **Clasificación**: asignación de los datos de inventario a las categorías de impacto seleccionadas. Al optar por una metodología de evaluación, se están seleccionando implícitamente las categorías consideradas por esta metodología. Por ejemplo, las emisiones de CO₂ están relacionadas con el potencial de calentamiento global. Las emisiones de SO₂, por su lado, están relacionadas con el Potencial de acidificación.
3. **Caracterización**: aplicación de modelos para obtener un indicador ambiental en cada categoría de impacto, unificando a una única unidad de referencia todas las sustancias clasificadas dentro de cada categoría, mediante el empleo de factores de peso o equivalencia. Estos son los denominados factores de caracterización, que representan la contribución de una sustancia a una categoría de impacto, en relación a la unidad de referencia (sustancia equivalente) establecida. Por ejemplo, los factores de caracterización relativos a potencial de calentamiento global para CO₂ es igual a 1, mientras que para el

CH₄ es 25 (de acuerdo al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, para un periodo de 100 años (IPPC, 2007))

4. **Normalización:** evaluación de la significación de u perfil ambiental generado en los pasos anteriores, para lo que se dividen los resultados de caracterización por unos factores de normalización que representan una magnitud real o estimada para cada categoría de impacto, de modo que se obtienen resultados adimensionales, comparables entre sí. Los factores de normalización funcionan, por tanto, como elementos que permiten visualizar la importancia relativa de cada categoría de impacto, establecida, por ejemplo, con relación al conjunto de la actividad mundial, del país o de la región donde se realiza el estudio.
5. **Valoración o ponderación:** esta etapa permite determinar, cualitativa o cuantitativamente, la importancia relativa de las distintas categorías de impacto, con el fin de obtener un resultado único o indicador ambiental.

Selección de los indicadores ambientales

Los indicadores ambientales responden al propósito de comprender el comportamiento del sistema, en términos de la relevancia del impacto ambiental generado. Los resultados deben permitir identificar los aspectos ambientales de mayor relevancia, de forma comprensible y fácilmente comunicable (Baumann y Tillman, 2004). Para cumplir este objetivo, los modelos de ACV seleccionan diferentes aspectos ambientales y condensan la información en indicadores que expresan los resultados de inventario. Como se ha observado en la revisión crítica, éste es un punto que presenta grandes discrepancias de unos estudios a otros, puesto que no siempre se consideran las mismas categorías de impacto.

En el método propuesto se han considerado las siete categorías de impacto que establece el estándar europeo (CEN) relativo al impacto ambiental de los edificios (UNE-EN 15978, 2012), dado que existe un amplio consenso en su relevancia y una solidez científica en los modelos de cálculo. Los impactos incluidos en la norma CEN son los siguientes:

- Potencial de agotamiento de recursos abióticos para elementos (ADP_non fossil, kg Sb eq).
- Potencial de agotamiento de recursos abióticos para combustibles fósiles (ADP_fossil, MJ valor calorífico neto).
- Potencial de acidificación de tierra y agua (AP, kg SO₂ eq).
- Potencial de eutrofización (EP, kg (PO₄)³⁻ eq).

- Potencial de calentamiento global (GWP, kg CO₂ eq).
- Potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférica (ODP, kg CFC 11 eq).
- Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos del ozono troposférico (POCP, kg C₂H₄ eq).

Clasificación y Caracterización

Las metodologías de evaluación de impacto de ciclo de vida pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Metodologías *midpoint* o de impactos de efecto intermedio: son metodologías enfocadas al problema, que tienen como resultado la definición de un perfil ambiental, mediante la cuantificación del efecto ambiental sobre diversas categorías (acidificación, destrucción de la capa de ozono, etc.), del producto/proceso/servicio analizado. En contraposición al segundo grupo de metodologías, abordan la evaluación de efectos indirectos o intermedios sobre el ser humano y el medio natural (Rivela, 2012).
- Metodologías *endpoint* o de impactos de efecto final: son metodologías orientadas al daño, que analizan el efecto último del impacto ambiental, esto es, tratan de identificar y definir el daño causado al hombre y a los sistemas naturales. Las categorías de impacto finales son variables que afectan directamente a la sociedad, por lo que su elección resulta más comprensible a escala global (Rivela, 2012). La modelización del daño permite no sólo la caracterización (potenciales impactos de las categorías estudiadas, como por ejemplo el cambio climático), sino que analiza el daño producido sobre el entorno considerado (Erlandsson y Lindfors, 2003; Goedkoop et al., 1998; Hertwich y Hammitt, 2001; Itsubo, 2002; Seppälä y Hämäläinen, 2001)

Para cada una de las categorías de impacto incluidas en la normativa desarrollada en el contexto europeo, existen varios modelos de evaluación del impacto. Con el fin de promover la armonización en el cálculo, las normas europeas estipulan qué métodos de evaluación de impacto deben utilizarse para cada categoría. Siguiendo las recomendaciones de la norma, en la presente tesis se adopta el método de cálculo CML versión 4.1 (con fecha de octubre 2012). La norma EN 15804:2012+A1:2013 (2014) recoge los factores de caracterización tomados de la versión 4.1 de la base de datos CML-IA, fechada en Octubre de 2012 (Instituto de ciencias ambientales (CML) de la Universidad de Leiden, Países Bajos).

Normalización

La normalización de los resultados obtenidos en la evaluación contribuye a comprender la magnitud relativa de los indicadores numéricos obtenidos en la caracterización. En términos de valor absoluto, una contribución a determinada categoría de impacto puede parecer muy significativa; sin embargo, es posible que al considerar su contribución relativa, ésta resulte despreciable (Rivela, 2012). La normalización consiste en obtener, a partir de unos factores de normalización, unos resultados adimensionales de las categorías de impacto, de modo que sean comparables entre sí. Los factores de normalización funcionan, por lo tanto, como elementos que permiten visualizar la importancia relativa de cada categoría de impacto, establecida, por ejemplo, con relación al conjunto de la actividad mundial, del país o de la región donde se realiza el estudio. Para la metodología CML existen actualmente cuatro métodos de normalización.

Figura 3.6. Resultados normalizados del estudio ambiental de la rehabilitación de una cubierta en Madrid. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3.6, se muestran, a modo de ejemplo, los resultados de normalización de la rehabilitación de la cubierta para el modelo definido en Madrid. Como se puede observar, en función del método de normalización seleccionado, la importancia del indicador varía, restando objetividad al análisis. Por ello, este paso no se adopta en la presente metodología.

Valoración monetaria

Los resultados de la evaluación proporcionan la información sobre el comportamiento ambiental del objeto evaluado, en base a las categorías de impacto que han sido seleccionadas. Esta información ha de constituir la base para la toma de decisiones. Sin embargo, la multiplicidad de resultados individuales no resulta de ayuda para ello. El carácter holístico de la toma de decisiones, requiere un juicio sobre la importancia relativa de los diferentes impactos dentro del comportamiento global de las alternativas que están siendo consideradas (AlWaer et al., 2008).

La valoración monetaria es un paso opcional en el ACV, cuyo objetivo es expresar, en términos económicos, cómo se ve afectado el bienestar de las generaciones actuales y futuras por los impactos ambientales causados por las actividades o sistema objeto de estudio -en este caso, el sector de la edificación. Estos costes ambientales (también denominados “costes externos” o “costes sombra”) surgen cuando los costes y beneficios resultantes de las actividades sociales y económicas de un grupo de personas repercuten sobre otro, sin que el primer grupo tenga plenamente en cuenta dicha repercusión (European Commission, 2008).

Entre los años 1990-2005 la Comisión desarrolló una serie de proyectos para la externalización de los costes energéticos y su internalización en Europa, bajo la denominación *External Cost of Energy* (ExternE), que contó con un equipo multidisciplinar conformado por ingenieros, economistas y epidemiólogos. La metodología ExternE está ampliamente aceptada por la comunidad científica y constituye un referente a nivel mundial (European Commission, 2005).

Entre los años 2004 y 2008 se desarrolló el proyecto NEEDS (New Energy Externalities Development for Sustainability), financiado por el 6º Programa Marco, ejecutado por un consorcio de 80 socios de 30 países, que incluían un 20% de Pymes y un mix equilibrado de universidades, centros de investigación, industria y ONG. Este proyecto supuso un avance en tres áreas principales:

- ACV de tecnologías energéticas.
- Valoración monetaria de las externalidades de la producción energética, el transporte, la conversión y el uso.

- La integración del ACV y las externalidades en la formulación de políticas y elaboración de escenarios.

Posteriormente, en el año 2012 la Agencia Pública de Residuos de Flandes (OVAM), junto con la Universidad de Lovaina (KU Leuven), el centro de investigación VITO y el Instituto Belga de Investigación de la Construcción (WTCB), desarrollaron el método MMG2012 (Debacker et al., 2012), un método de monetización que posibilite una aproximación integral en la evaluación, aplicado al sector de construcción en Bélgica. Este método parte de los indicadores y datos generados en proyectos previos, como son ReCiPe (<http://www.lcia-recipe.net>), ExternE-NEEDS (European Commission, 2005; Preiss y Klotz, 2008) y el Manual de costes de sombra desarrollado por Bruyn et al. (2010).

En un intento de armonización y de alineación con los criterios metodológicos que actualmente se están desarrollando en el contexto europeo, la metodología ha sido actualizada (MMG2014), adaptando las categorías de impacto monetizadas a las categorías de impacto y los métodos de cálculo definidos por las normas europeas. Adicionalmente, el método proporciona valores para Bélgica, Europa Occidental y resto del mundo. Tras un análisis previo de otros métodos existentes de monetización (Pizzol et al., 2015; Ahlroth, 2014; Allacker y De Nocker, 2012; Bruyn et al., 2010; Waldhoff et al., 2011), finalmente se ha seleccionado el método descrito para su aplicación en la presente investigación, adoptando los valores desarrollados en el método MMG2014 para los países de Europa Occidental (Tabla 3.7).

En el cálculo del coste ambiental, para cada uno de los indicadores ambientales, se multiplican los resultados obtenidos por el factor de monetización descrito en la Tabla 3.7. Por ejemplo, si para la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global (GWP) el resultado es X kg CO₂ equivalentes, y el valor de monetización es 0,1 €/kg CO₂ equivalentes, se debe multiplicar X por 0,1 para obtener los costes ambientales de esta categoría. Este procedimiento se repite para todas las categorías de impacto, obteniendo los costes ambientales de cada una de ellas. Al estar todos los resultados monetizados, expresado en una misma unidad (euros), se pueden sumar los resultados, obteniendo una calificación global. El factor de monetización indica el coste del daño al medioambiente y/o a los seres humanos para evitar el potencial de daño o compensar los perjuicios causados (Allacker et al., 2013). De este modo, los costes ambientales pueden compararse/sumarse con los costes financieros, proporcionando una única métrica común. Esto ofrece un valor añadido para la toma de decisiones con respecto a otros métodos de ponderación, como el método de panel, el método distancia al objetivo y otros métodos de análisis de daño (Allacker, 2010).

Tabla 3.7. Resumen de los valores monetarios de Europa Occidental (central, inferior y superior) para los indicadores CEN. adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Indicador ambiental	Unidad	Central (€/unidad)	Inferior (€/unidad)	Superior (€/unidad)
ADP_non fossil	kg Sb eq	1,56	0	6,23
ADP_fossil	MJ, valor calorífico neto	0	0	0
AP	kg SO ₂ eq	0,43	0,22	0,88
EP	kg (PO ₄) ³⁻ eq	20	6,60	60
GWP	kg CO ₂ eq	0,100	0,050	0,200
ODP	kg CFC 11 eq	49,10	25	100
POCP	kg C ₂ H ₄ eq	0,48	0	6,60

La metodología seleccionada, MMG2014 (De Nocker y Debacker, 2015), se basa en dos métodos de valoración monetaria, eligiendo el más adecuado para cada categoría de impacto en función de la calidad de los datos existentes (Tabla 3.8). Los métodos considerados son el método de costes de daño (*damage cost*) y el método de costes de prevención (*prevention cost*).

A continuación se describen brevemente estos dos métodos:

En el primer método, el coste de daño, la calidad ambiental se valora en base al daño estimado resultante de las emisiones u otros cambios en el capital natural. Este método pretende cuantificar lo que los ciudadanos estarán dispuestos a pagar para no dañar el medioambiente o reducir los impactos ambientales.

El método de costes de prevención, también denominado costes de control o reducción (*control or abatement costs methods*), valora un impacto basado en el coste marginal necesario para cumplir el objetivo de la política relacionada con dicho impacto. Esto requiere una política clara, bien sea en términos de reducción de emisiones o de objetivos de calidad ambiental, y una evaluación coste-beneficio todas las medidas potenciales de prevención.

La Tabla 3.8 muestra la información existente para las categorías de impacto consideradas en la presente investigación, señalando la calidad de la misma, que se refleja mediante una puntuación en una escala de + a +++. Para todas las categorías de impacto, existe información relativa a los costes de daño, especialmente si los impactos en la salud pública y la agricultura son categorías importantes (p. ej. la disminución de la capa de ozono estratosférica o el ozono troposférico). Como se observa en esta tabla, los costes de prevención son más reducidos. Esto se debe, fundamentalmente, a que es necesario que exista una política clara relacionada con la categoría de impacto correspondiente y un análisis coste-eficacia. Estos datos están disponibles para el calentamiento global y los problemas de calidad atmosférica. Las categorías

relacionadas con este último aspecto (acidificación, formación de ozono) se han calificado con un +, dado que se trata de un problema multi-recurso y multi-efecto, que dificulta analizar los costes de prevención de efectos individuales

Tabla 3.8. Resumen de los métodos existentes por categoría de impacto y los métodos utilizados para las estimaciones centrales, inferiores y superiores. Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Indicador ambiental	Costos de daño (CD)	Costos de prevención (CP)	Estimación central	Estimación del rango superior-inferior
ADP_non fossil	+	-	CD	CD, CP
ADP_fossil	+	+	CD	CD, CP
AP	++	+	CD	CD, CP
EP	+	+	CD, CP	CD, CP
GWP	+	++	CP	CD, CP
ODP	++	+	CD	CD, CP
POCP	+++	-	CD	CD

En base a la a la información obtenida en la Tabla 3.8, el MMG2014 adopta el cálculo de los factores de monetización mediante el método de coste de daño para todas las categorías de impacto, a excepción del calentamiento global, categoría para la que se utiliza el método de prevención, debido a que la información existente presenta una mejor calidad (De Nocker y Debacker, 2015).

Previo a la explicación de cómo el método MMG2014 determina los valores de monetización expuestos en la Tabla 3.7, es preciso realizar una breve explicación sobre cómo considera el método el descuento y la incertidumbre:

- **Tratamiento del descuento en el método MMG2014**

El valor de los impactos futuros se descuenta mediante la tasa de descuento social. La elección de este parámetro ha sido objeto de debate en numerosos estudios, pero no existe un acuerdo global sobre qué tasa utilizar (Pearce, 2003; Arrow et al., 2012). Estos debates revelan que la tasa de descuento podría verse modificada en función del objetivo de la evaluación (Goulder y Williams, 2012), el horizonte temporal de los impactos (Arrow et al., 2012; Lowe, 2008; Commissariat général du Plan, 2005), aspectos éticos, incluyendo la ponderación equitativa (Anthoff et al., 2009), periodo de ponderación, incertidumbre y primas de riesgo (Kousky et al., 2011; Van den Bergh, 2007).

Para la estimación de los valores centrales el método utiliza una tasa de descuento social del 3%. Este valor está en línea con las recomendaciones de diversas

instituciones gubernamentales y estudios considerados en el marco de trabajo del MMG2014 (Ochelen y Putzeijs, 2010; Commissariat général du Plan, 2005; Lowe, 2008; Van den Bergh, 2007; Goedkoop et al., 2013). La tasa de descuento adquiere gran importancia en la evaluación de los costes sociales del calentamiento global, como se detallará en el siguiente apartado.

- **Tratamiento de la incertidumbre en el método MMG2014**

En relación a la incertidumbre relativa a la evaluación del impacto y su valoración, es importante distinguir entre “variabilidad” (p. ej. diferentes localizaciones de las emisiones) e “incertidumbre” debido a la limitada comprensión de los límites de los impactos en la modelación de todas las interacciones (Webster y Mackay, 2003; Spadaro y Rabl, 2008; Holland et al., 2013).

En cuanto a la “variabilidad”, el método considera valores monetarios para Bélgica, para los países de Europa Occidental (Tabla 3.7) y para el resto del mundo. En relación a la “incertidumbre”, el método propone un intervalo de confianza para la presentación de los resultados. Se emplea una estrecha banda para la estimación de los valores inferiores y superiores que, para algunas categorías, se calcula mediante la desviación típica (σ). La Tabla 3.9 describe la manera en que se estiman los valores superiores e inferiores.

Tabla 3.9. Planteamiento de la incertidumbre in MMG2014. Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

	Incertidumbre*	Variabilidad espacial**
Parámetro utilizado	BW = ancho de banda, criterio experto σ = desviación típica (para algunas categorías)	-
Valor central	μ_g = valor central o esperado	Europa occidental Flandes / Bélgica Resto del Mundo***
Estimación baja	$\mu_g / (\sqrt{BW}) \approx \mu_g / (\sigma / 2)$	
Estimación alta	$\mu_g * (\sqrt{BW}) \approx \mu_g * (\sigma / 2)$	

*Depende de la desviación típica (σ), calculada para cada categoría de impacto.

**Depende de la localización de la actividad y su impacto.

***Se aplica una aproximación específica para la estimación alta y baja.

Las estimaciones altas y bajas en Europa Occidental y Flandes, se basan en un ancho de banda (Tabla 3.10) y se calculan de acuerdo a lo expuesto en la Tabla 3.9. En los casos en los que la estimación baja es cero, se considera la desviación típica.

Tabla 3.10. Descripción de los valores de incertidumbre para los indicadores CEN. Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Indicador ambiental	σg^*	BW	$\sqrt{BW}$
ADP_non fossil	5	16	4
ADP_fossil	/	16	/
AP	4	4	2
EP	5	9	3
GWP	5	4	2
ODP	4	4	2
POCP	4	4	2

* Desviación típica para el resultado esperado, asumiendo una distribución log-normal, y utilizada para calcular la estimación mínima y máxima en el método MMG2012.

BW: ancho de banda.

A continuación se detalla cómo se obtienen los valores monetarios en el método MMG2014 para cada categoría de impacto.

Valoración monetaria del Potencial de agotamiento de recursos abióticos para elementos (ADP_non fossil)

El valor inferior es nulo, y refleja el punto de vista de que los costos de agotamiento de recursos son internalizados en los precios (Bruyn et al., 2010).

La estimación alta se basa en los costes adicionales para las generaciones futuras para la extracción de materias primas. Los métodos de evaluación y valoración se discuten en MMG2012 (Debacker et al., 2012). Se basa en el método ReCiPe (Goedkoop et al., 2013) y en los costes adicionales de la energía necesaria para la extracción, que puede interpretarse como un “coste de agotamiento de recursos”. Esto equivale a 0,0518 € / kg Fe, que corresponde al 0,1 % del precio de mercado de Fe (el precio de mercado de 1 kg Fe_{eq} = 72 \$ / kg).

Los costes del agotamiento de recursos difieren entre los recursos, en función de, por ejemplo, el grado actual de metales en el mineral. En el método ReCiPe, estos costes se calculan para 20 sustancias. Expresado como un porcentaje del precio de mercado de las sustancias, el coste de agotamiento de los recursos varía de 0,1% a más del 600%, con un valor mediano de 3,4% y una media del 88%.

Tal como se observa en la Tabla 3.11, el coste de agotamiento de los recursos difiere ampliamente según se realiza con el método ReCiPe o en base a los precios de mercado. Por tanto, el coste de agotamiento de los recursos para Sb, se estima en base al valor medio para el ratio entre los costes de agotamiento de los recursos y el precio de mercado. Este ratio es, de media, 82,9%. En un valor de mercado de 9,4 \$/kg Sb, esto resulta en un coste de agotamiento de los recursos de 7,8 \$/kg Sb o 6,23 €/kg Sb.

Tabla 3.11. Costes de agotamiento de los recursos para diferentes sustancias, basado en la relación con los precios de mercado. Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

	RDC ReCiPe \$/kg	precio de mercado \$/kg	ratio (1)/(2) %	RDC MMG2014 \$/kg	ratio (4)/(1) %	ratio (4)/(2) %
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Al	0,0064	1,3	0,49%	0,0002	3,1%	0,02%
Co	0,072	46	0,16%	0,200	277%	0,43%
Cr	1,78	9,6	19%	0,0002	0,0%	0,00%
Cu	3,06	7	44%	0,019	0,6%	0,28%
Fe	0,07	72	0,10%	0,00001	0,0%	0,00%
Ir	6,62	42000	0,02%	0,10	1,6%	0,00%
Mn	5,48	1,5	365%	0,0002	0,0%	0,01%
Mo	14,85	30	50%	0,55	3,7%	1,85%
Ni	0,9	40	2,25%	0,033	3,6%	0,08%
Os	464	77000	0,60%			
Pb	0,13	2,5	5,20%	0,117	89,9%	4,68%
Pd	273	58330	0,47%	72,95	26,7%	0,13%
Pt	11652	5400	216%	70,84	0,6%	1,31%
Rh	1455	80000	1,82%			
Ru	144	14000	1,03%			
Sn	90,99	13	700%	0,896	1,0%	6,89%
Zn	0,16	3,5	4,57%	0,028	17,8%	0,81%
Sb	na	9,4		7,8		82,9%
Media			89,2%	10,24	30,4%	6,6%

(1) RDC: costes de agotamiento de los recursos, estimados en base al método ReCiPe (Goedkoop et al., 2013).

(2) Precio de mercado, en \$/kg (obtenido de diversas fuentes)

(4) RDC: costes de agotamiento de los recursos, mediante el método del ratio medio RDC/precio de mercado y aplicado a los precios de mercado del Sb para el FE, los factores de caracterización del ILCD para Sb (1 kg Fe= 1,66 E-6 Sb) y para otros metales.

Para la estimación central, se utiliza el enfoque general, basado en un ancho de banda de 16:

- Estimación central = estimación alta / $\sqrt{16}$ = estimación alta / 4
- Estimación central = 6,23 €/kg Sb / 4 = 1,56 €/kg Sb

Tabla 3.12. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de agotamiento de recursos abióticos para elementos (ADP_non fossil). Fuente: Adaptado de MMG2014 (De Nocker y Debacker, 2015)

Indicador	Región	Valor monetario €/kg SO ₂ eq		
		Central	Inferior	Superior
Ciclo de vida completo	Europa Occidental	1,56	0	6,23
	Flandes / Bélgica	1,56	0	6,23
	Resto del mundo	1,56	0	6,23

Valoración monetaria del Potencial de agotamiento de recursos abióticos para combustibles fósiles (ADP_fossil)

Los valores central e inferior son cero. Esto refleja el punto de vista de que los costes de agotamiento de recursos son internalizados en los precios de mercado (Bruyn et al., 2010; Aguilera et al., 2009, 2012). Del mismo modo, este método, MMG2014, emplea una valoración de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) basada en los costes de prevención, que asumen que se limitan las emisiones de GEI para limitar el calentamiento global a un máximo de 2°C, en línea con el objetivo de la ONU. Esto limita el uso de combustibles fósiles, con independencia de su disponibilidad (De Nocker, 2010).

El valor superior se basa en el método Eco-indicador 99 (Allacker y De Nocker, 2012) y los costes de la acción militar para garantizar el suministro de energía (NDCF, 2007; Stern, 2010).

Tabla 3.13. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de agotamiento de recursos abióticos para combustibles fósiles (ADP_fossil). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Indicador	Región	Valor monetario €/kg SO ₂ eq		
		Central	Inferior	Superior
Ciclo de vida completo	Europa Occidental	0	0	0,0065
	Flandes / Bélgica	0	0	0,0065
	Resto del mundo	0	0	0,0065

Dado que los mercados energéticos son los mercados mundiales y el agotamiento es un problema a nivel mundial, no se aplican diferentes valores para diferentes países o regiones.

Valoración monetaria del Potencial de acidificación de tierra y agua (AP)

Los datos se basan en el método ExternE (European Commission, 2005), incluyendo los costes de daño para los efectos sobre los materiales de construcción y los ecosistemas, evaluados con el modelo Ecosens (ExternE-NEEDS) y el impacto en los ecosistemas (PDF) valorado en base a los costes de reposición (Ott et al., 2006). No incluye, en cambio, los impactos del SO₂ en la agricultura.

Los valores inferiores y superiores se calculan en base a lo expuesto en la Tabla 3.9:

- Estimación baja = estimación central / $\sqrt{4}$ = estimación central / 2
- Estimación alta = estimación central * $\sqrt{4}$ = estimación central * 2

Tabla 3.14. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de acidificación de tierra y agua (AP). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Indicador	Región	Valor monetario €/kg SO ₂ eq		
		Central	Inferior	Superior
Ciclo de vida completo	Europa Occidental	0,43	0,22	0,88
	Flandes / Bélgica	1,01	0,5	2,02
	Resto del mundo	0,17	0,00	2,02

Las diferencias entre Europa Occidental y Flandes (Tabla 3.14), reflejan las discrepancias en los efectos de las emisiones debido a las variaciones de la modelización del destino atmosférico en el impacto de acidificación (p. ej. dirección y velocidad del viento), de la ocupación del suelo, las precipitaciones, los materiales de construcción utilizados, etc. Los datos se calculan con el modelo EcoSense, según se refleja en los informes del proyecto CASES (*Cost Assessment for Sustainable Energy Systems*). Los datos para Europa Occidental se basan en la media de UE-27, mientras que los datos de Flandes se fundamentan en Bélgica.

Los datos mundiales parten de los datos para Europa Occidental, adaptándose a las diferencias en el PIB/cápita entre Europa y la media mundial, considerando divergencias en los niveles de precios. Por consiguiente, el valor para el resto del mundo es el 40% del valor para Europa Occidental.

Valoración monetaria del Potencial de eutrofización (EP)

Los métodos evaluación de costes ambientales y los datos para monetizar el indicador se basan en la revisión bibliográfica de los estudios que utilizan diversos métodos, incluyendo la “disposición a pagar” (*willingness to pay*) para evitar impactos de eutrofización (Gren, 2008), la modelización del destino e impacto para estimar los efectos en la biodiversidad (ExternE-EcoSense), que se valoran usando los “costes de reposición”, (Ott et al., 2006) y estudios de “prevención de costes” para alcanzar los objetivos de calidad de agua dulce, tal como exige la Directiva marco europea del agua (Broekx et al., 2008). Los resultados se expresan en €/kg N, y se transforman a €/kg (PO₄)³⁻eq, en base a los factores de caracterización del método CML (1 kg N = 0,42 kg (PO₄)³⁻eq).

El procedimiento para estimar los valores centrales, inferiores y superiores es ligeramente diferente comparado con otras categorías de impacto. Dado que existe un número limitado de estudios, con resultados que varían ampliamente, se utilizan estos resultados para determinar el valor superior e inferior. Suponiendo una distribución logarítmica normal de los valores, se estima el valor central.

El valor central para Europa Occidental es de 20 €/kg (PO₄)³⁻eq, con un ancho de banda de 6,6 a 60 (Tabla 3.15). El valor inferior se basa en el impacto de las emisiones de N en los ecosistemas (PDF), que se valoran a partir en los costes de reposición de Ott (2006). La estimación alta se fundamenta en la disposición a pagar para evitar la eutrofización (Gren, 2008). El ancho de banda entre estimación baja y alta es un factor de 9. Esta amplia gama refleja las grandes incertidumbres que intervienen en la estimación y valoración de los impactos de eutrofización. Este ancho de banda no refleja todas las incertidumbres, como por ejemplo, las relacionadas con el uso de diferentes indicadores (N frente a P) y sus pesos relativos según lo informado en CML-2012, ReCiPe (Goedkoop et al., 2013) y MIRA (VMM, 2007).

Suponiendo una distribución logarítmica normal y los valores inferiores y superiores, la estimación para el valor central para Europa Occidental es de 20 (= 60 /3)

Tabla 3.15. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de eutrofización (EP). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Indicador	Región	Valor monetario €/kg (PO ₄) ³⁻ eq		
		Central	Inferior	Superior
Ciclo de vida completo	Europa Occidental	20	6,6	60
	Flandes / Bélgica	40	9,2	175
	Resto del mundo	8	0	175

Valoración monetaria del Potencial de Calentamiento Global (GWP)

La valoración monetaria se basa en el análisis de los costes de prevención. Los valores reflejan los costes para la economía global de limitar las emisiones de GEI con el fin de reducir el calentamiento global en 2°C. La evaluación se basa en un meta-análisis de diferentes modelos para alcanzar este objetivo (Kuik et al., 2008), así como otros estudios que estiman estos costes. El valor estimado se ha comparado con el daño esperado del calentamiento global. Este último tiene mayor grado de incertidumbre, y los daños estimados están incompletos. No obstante, la información del daño que puede ser estimada mediante el enfoque de coste del daño confirma las estimaciones del enfoque del coste de prevención.

Estudios recientes, basados en los costes de prevención, confirman que es posible alcanzar el objetivo de la ONU para limitar el Cambio Climático en un máximo de 2°C, si se adoptan fuertes medidas a nivel mundial en todos los sectores y países (Edenhofer et al., 2010; Naucclér y Enkvist, 2009; Vuuren et al., 2011; Taylor, 2010). Esto requerirá grandes inversiones en las próximas décadas. Todos los estudios indican que el coste marginal de las medidas, incrementará a lo largo del tiempo, para seguir en la senda de

la estabilización de los 2°C para 2100. Los valores que adopta el método elegido se basan en estudios similares como VMM (De Nocker, 2010) y el MMG2012 (Debacker et al., 2012), y el estudio de Kuik (2008) para la prevención de costes del calentamiento global. Este estudio recomienda un valor central de 90 €/ton CO₂eq para la emisiones de 2015. Reino Unido ha adaptado sus directrices para los costes sociales, que se basan en los costes de prevención oscilando entre 79 €/ton CO₂eq para 2015 y 281 £/ton CO₂eq para 2050. El gobierno de EE.UU. recomienda un coste social de carbono para en el análisis coste-beneficio que oscila entre 4 € y 53 €/ton CO₂eq (United States Government, 2010). Las discrepancias entre EE.UU. y Europa reflejan las diferencias en las políticas de cambio climático, en línea con el método de coste de prevención. En la metodología MMG2014 se ha estimado un valor único, basado en los siguientes criterios:

- El método MMG2012 establece un valor de 0,02 €/kg CO₂eq en 2010 con un incremento anual de 6,2%. Este valor es el que da la Comisión Europea en las directrices que complementan la Directive 2010/31/UE (Comisión Europea, 2012).
- Distribución de las emisiones de GEI a lo largo del tiempo, siguiendo la atribución de las emisiones a las distintas fases como en Debacker et al. (2013), 30% a la producción y sustitución, 65% a la fase de uso y 5% al fin de vida.
- Justificación de la inflación pasada, el crecimiento económico esperado (basado en los escenarios IPCC) y el descuento (3%), en línea con las hipótesis y enfoque en RICARDO-AEA (Korzhenevych et al., 2014).

El resultado del análisis se ha redondeado a 0,1 €/kg CO₂eq o 100 €/ton CO₂eq. Este resultado es similar a los 90 €/ton CO₂eq considerados en la mayoría de directrices para costes externos de transporte (Korzhenevych et al., 2014). En el método MMG2014, el importe es algo más elevado, dado que la mayoría de los procesos que se consideran ocurrirán en el futuro. Como se observa en la Tabla 3.16, no existe variación en la localización.

Los valores inferiores y superiores se calculan en base a lo expuesto en la Tabla 3.9:

- Estimación baja = estimación central / $\sqrt{4}$ = estimación central / 2
- Estimación alta = estimación central * $\sqrt{4}$ = estimación central * 2

Tabla 3.16. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de calentamiento global (GWP). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Indicador	Región	Valor monetario €/kg CO ₂ eq		
		Central	Inferior	Superior
Ciclo de vida completo	Europa Occidental	0,100	0,05	0,200
	Flandes / Bélgica	0,100	0,05	0,200
	Resto del mundo	0,100	0,05	0,200

Valoración monetaria del Potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférica (ODP)

Los valores centrales se calculan en base a los costes de daño para la salud, agricultura y materiales (Goedkoop et al., 2013; Bruyn et al., 2010). Los primeros, incluyen el daño a la salud mundial por la disminución de la capa de ozono, en particular, el aumento del riesgo de cáncer de piel y enfermedades oculares (cataratas). En base al modelo AMOUR (Modelo de evaluación de la radiación UV y sus riesgos) (Kelfkens et al., 2002), desarrollado por el Instituto Nacionales de Salud Pública y Medioambiente holandés (RIVM), se calcula cuáles son los efectos adicionales de la emisión de sustancias que agotan el ozono. Los efectos sobre la salud (cáncer y cataratas) se ponderan en términos de DALY (*disability-adjusted life year*—años de vida ajustados por discapacidad) y se valoran en 60 k€/DALY. Dado que la mayoría de los impactos de las emisiones se producen en el futuro (con un pico después de 40 años, por lo tanto alrededor de 2050), los futuros costes de los daños deben ser descontados. Convertido a CFC 11 eq, el resultado es un coste de daños de 49,1 €/kg CFC 11 eq.

Los valores inferiores y superiores se calculan en base a la desviación típica estimada en el MMG2012 (Debacker et al., 2012). Esto resulta en un ancho de banda de 4 (Tabla 3.10) entre la estimación mínima y máxima:

- Estimación baja = estimación central / $\sqrt{4}$ = estimación central / 2
- Estimación alta = estimación central * $\sqrt{4}$ = estimación central * 2

Tabla 3.17. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférica (ODP). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Indicador	Región	Valor monetario €/kg CFC 11 eq		
		Central	Inferior	Superior
Ciclo de vida completo	Europa Occidental	49,1	25	100
	Flandes / Bélgica	49,1	25	100
	Resto del mundo	49,1	25	100

Valoración monetaria del Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos del ozono troposférico (POCP)

Los datos se basan en el método ExternE, que estima los impactos de la formación de ozono, especialmente en la salud pública (European Commission, 2005). El modelado de destino se basa en el modelo Ecosense (para Europa Occidental) y en el modelo Beleuros (para Flandes). La evaluación de impacto y su valoración está basada para ambos en el método ExternE, que da lugar a diferentes estimaciones para diferentes precursores del ozono (NOx y COVDM).

Dado que el proceso de formación de ozono es un proceso complejo, en el que los precursores del ozono (NOx y COVDM) pueden contribuir tanto a la formación de ozono como a la descomposición, el impacto marginal de diferentes contaminantes varía mucho en tamaño, espacio y tiempo. El MMG2014 incorpora este efecto en los valores inferiores y superiores, así como en la variación espacial.

Los valores inferiores se basan en la contribución de las emisiones de NOx. Esta contribución es nula, ya que en algunas situaciones las sustancias tratadas no conducen a la formación de oxidantes fotoquímicos (los precursores de ozono pueden tener tanto el efecto de la formación como la desfragmentación del ozono fotoquímico). Los valores superiores se basan en los impactos de los precursores del ozono con contribución neta a la formación de ozono (COVDM).

Los datos de Europa Occidental se basan en los datos del proyecto ExternE (European Commission, 2005), según los cálculos de Ecosense y los informes del proyecto CASES para la UE-26. Los datos de Flandes se basan en cálculos de De Nocker et al. (2010). Para el resto del mundo, los valores de Europa Occidental se adaptan a las diferencias en el PIB / cápita (PPP) entre Europa y el resto del mundo.

Para estimar el valor superior de Europa Occidental y Flandes, se aplica el enfoque general, sobre la base de un ancho de banda de 16.

- Estimación central = estimación alta / $\sqrt{4}$ = estimación alta / 2

Para Europa y el resto del mundo se asume que el valor superior puede ser tan alto como el de Flandes.

Tabla 3.18. Indicador monetario para la categoría de impacto del Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos del ozono troposférico (POCP). Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Indicador	Región	Valor monetario €/kg (PO ₄) ³⁻ eq		
		Central	Inferior	Superior
Ciclo de vida completo	Europa Occidental	20	6,6	60
	Flandes / Bélgica	40	9,2	175
	Resto del mundo	8	0	175

Tabla 3.19. Resumen de los valores monetarios de Europa Occidental (central, inferior y superior) para los indicadores CEN y el método de cálculo. Fuente: adaptado de De Nocker y Debacker (2015).

Indicador ambiental	Unidad	Método	Central (€/unidad)	Inferior (€/unidad)	Superior (€/unidad)
ADP_elementos	kg Sb eq	CD	1,56	0	6,23
ADP_combustibles fósiles	MJ, valor calorífico neto	CD	0	0	0
AP	kg SO ₂ eq	CD	0,43	0,22	0,88
EP	kg (PO ₄) ³⁻ eq	CD	20	6,60	60
GWP	kg CO ₂ eq	CP	0,100	0,050	0,200
ODP	kg CFC 11 eq	CD	49,10	25	100
POCP	kg C ₂ H ₄ eq	CD	0,48	0	6,60

CD: coste del daño; CP: coste de prevención

3.3.4.2. Interpretación de resultados

La fase de interpretación es el momento en el que se combinan los resultados del análisis de inventario con la evaluación de impacto, comprobando que los resultados obtenidos son coherentes con el objetivo planteado en la evaluación. La interpretación debe realizarse forma transparente, identificando las alternativas preferibles desde la óptica ambiental.

3.3.5. Evaluación del comportamiento económico

La normativa internacional que regula el Análisis de Coste de Ciclo de Vida (CCV) es la ISO 15686-5 (2008). De acuerdo a esta normativa, el CCV se define como un método que permite análisis de costes comparativos que se llevarán a cabo en un periodo especificado, teniendo en cuenta todos los factores económicos relevantes, tanto en términos de coste de inversión como costes operacionales futuros. En junio 2015 se aprobó la norma europea UNE-EN 16627 (2015), que proporciona las reglas de cálculo para la evaluación del comportamiento económico de edificios. En esta norma se han incluido los principios desarrollados en la Norma ISO 15686-5, adaptándolos a la evaluación de la sostenibilidad en el contexto europeo.

3.3.5.1. Cálculo de costes e ingresos

Como ya se ha comentado anteriormente, en los últimos años, el CCV se ha aplicado en rehabilitación con el fin de determinar las estrategias más rentables (Amstalden et al., 2007; Gaterell y McEvoy, 2005b; Goodacre et al., 2002; Gorgolewski, 1995; Mahlia et al., 2005; Papadopoulos et al., 2002; Ostermeyer et al., 2013). El método de cálculo más utilizado ha sido el Valor Actual Neto (VAN) (Amstalden et al., 2007; Nemry et al., 2010; Ouyang, et al., 2011b; Risholt et al., 2013; Vrijders y Wastiels, 2013), que se define como la suma de los flujos de caja futuros descontados (UNE-EN 16627, 2015).

La rehabilitación de un edificio con criterios de eficiencia energética requiere una inversión económica importante. Sin embargo, genera unos ahorros en el consumo energético durante toda la vida útil del edificio. Para que una medida de rehabilitación sea rentable, los ahorros energéticos totales de la vida útil del edificio deben ser mayores a la inversión de capital (Gorgolewski, 1995). Por ello, en la metodología propuesta y al hilo de cómo se está evaluando el comportamiento económico, el VAN se calcula de la siguiente manera:

$$VAN(r, N) = -C_R - \sum_{t=0}^N \frac{C_{MRm}(1+i_m)^t + C_{MRI}(1+i_l)^t}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^N \frac{S_g(1+i_g)^t + S_e(1+i_e)^t}{(1+r)^t} - \frac{C_{EOLN}}{(1+r)^N}$$

Donde r es la tasa de descuento real (%); N es la vida útil (años); t es el año (-); i_m , i_l , i_g , i_e son las tasas reales del incremento del precio de los materiales de construcción, mano de obra, gas y electricidad respectivamente (%); C_R es el coste de rehabilitación (€); C_{MRm} es el coste de los materiales para el mantenimiento y sustitución (€); C_{MRI} es el coste de mano de obra para el mantenimiento y sustitución (€); S_g es el ahorro de gas (€); S_e es el ahorro de electricidad (€); C_{EOL} es el coste de fin de vida (€).

Si el valor obtenido en el cálculo resulta positivo, la inversión se considera rentable. En la presente investigación, no se ha considerado el análisis del Coste de Ciclo de Vida integral (*Whole-Life Cost*, WLC), definido por la Norma ISO 15686-5, que incorpora desde los costes e inversiones externos al proceso constructivo, hasta los financieros y fiscales; incluye también los ingresos generados por el inmueble a lo largo de la vida útil, entre los que incorpora el valor residual del suelo al final de la misma, una vez desaparecido el edificio (García-Erviti et al., 2015)

Parámetros económicos

Para el cálculo del VAN es preciso definir algunos parámetros, que como se observa en la ecuación anterior, permiten trasladar los flujos de caja al futuro y descontarlos al presente. La Norma ISO 15686-5 (2008) recomienda realizar los cálculos utilizando valores reales en lugar de nominales. Los valores reales son aquellos que no tienen en cuenta la inflación. A continuación, se definen los parámetros considerados en la presente investigación.

Tasa de descuento real (r)

La tasa de descuento, o también llamada tasa de actualización, es el factor que refleja el valor temporal del dinero y que se utiliza para convertir al momento actual los flujos de caja acontecidos en diferentes años futuros. Según las directrices que acompañan a la EPBD 2012 (Comisión Europea, 2012), una tasa de actualización superior al 4% reflejará un enfoque puramente comercial, a corto plazo, de valoración de las inversiones. Una tasa inferior, comprendida entre el 2% y el 4%, reflejará más fielmente las ventajas que aportan las inversiones en eficiencia energética a los ocupantes del edificio durante todo el ciclo de vida de la inversión. Según la propia normativa, cada Estado Miembro debe definir este parámetro. Al mismo tiempo, la norma europea (UNE-EN 16627, 2015) recomienda el uso de una tasa de descuento real del 3%, por lo que se considera este valor en la evaluación.

Índice de Precios de Consumo (IPC)

A pesa de que en la presente investigación se consideran únicamente valores reales, el incremento del precio de la energía, los materiales de construcción y la mano de obra, llevan incorporado el valor del IPC, por lo que son valores nominales. Para obtener los valores reales, es necesario calcular el IPC. Para ello, la Figura 3.7 recoge la variación anual de dicho valor durante los últimos 20 años, según los datos recogidos del Instituto Nacional de Estadística (INE). El incremento medio es del 2,3%, por lo que se ha adoptado este valor.

Figura 3.7. Variación anual IPC. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Instituto Nacional de Estadística, INE.

Incremento real del precio de los materiales de construcción y la mano de obra

La **Figura 3.8** refleja el incremento de los materiales de construcción y la mano de obra entre 1996 y 2012, de acuerdo con los datos del INE. Los materiales incluidos son: cemento, cerámica, maderas, acero, aluminio y ligantes. El incremento medio de los materiales de construcción es de 4,19%, mientras que el de la mano de obra es del 2,3%.

Figura 3.8. Variación anual del precio de los materiales de construcción y de la mano de obra. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Instituto Nacional de Estadística, INE.

Como se ha comentado anteriormente, es necesario restar el efecto de la inflación de estos valores para poder utilizarlos en el análisis. Para ello, se usa la siguiente ecuación:

$$i_m = \frac{1 + I_m}{1 + IPC} - 1$$

Donde i_m : incremento real del precio de materiales de construcción; I_m : incremento nominal del precio de materiales de construcción.

Evolución del precio de la energía

Los datos relativos al precio de la energía se han recogido de la base de datos de EUROSTAT (2015a, 2009a, 2015b, 2009b). Se ha seleccionado el precio para el sector residencial, incluidos impuestos, pues lo que interesa en esta investigación es el coste para el usuario final. Predecir el incremento del precio de la energía para los próximos 50 años es inviable. Por consiguiente, se ha estudiado cómo ha sido dicho crecimiento en los últimos 10 años. Hubiera sido recomendable revisar un periodo de tiempo mayor, pero no existían datos de años anteriores a 2003. La Figura 3.9 muestra la evolución del precio de la energía en edificios residenciales, impuestos incluidos, de los últimos 10 años. El incremento medio de los últimos 10 años es del 5,95% para el gas natural y 7,62% para la electricidad.

Figura 3.9. Evolución del precio de la energía para edificios residenciales. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Eurostat (2015b, 2009b, 2015a, 2009a).

En base a este análisis, se ha adoptado el precio de gas natural y electricidad de 2014, siendo 0,0752 y 0,186 €/kWh respectivamente. Como se ha comentado anteriormente, es necesario restar el efecto de la inflación de estos valores para poder utilizarlos en el análisis. Para ello, se usa la siguiente ecuación:

$$i_g = \frac{1 + I_g}{1 + IPC} - 1$$

Donde I_g : incremento real del precio del gas natural; I_g : incremento nominal del precio del gas natural.

La Tabla 3.20 resume los parámetros económicos considerados en la metodología propuesta, siendo válidos para el contexto español.

Tabla 3.20. Datos de entrada de los costes y la tasa de incremento real para el CCV.

Parámetro económico	Valor y referencia
Precio del gas natural	0,0752 €/kWh (EUROSTAT, 2015b)
Precio de la electricidad	0,186 €/kWh (EUROSTAT, 2015a)
Tasa de descuento	3% (Comisión Europea, 2012; UNE-EN 16627, 2015)
Incremento del precio de los materiales de construcción	1,85% (INE, 2015)
Incremento del precio de mano de obra	0% (INE, 2015)
Incremento del precio del gas	3,5% (EUROSTAT, 2009b, 2015b)
Incremento del precio de electricidad	5% (EUROSTAT, 2015a, 2009a)
IVA	10%*

*IVA reducido a los proyectos de rehabilitación integral de edificios.

3.3.6. Optimización multicriterio

Una vez evaluados los impactos energéticos, ambientales y económicos del Ciclo de Vida, es preciso definir una optimización multicriterio que permita identificar las estrategias de rehabilitación más adecuadas.

En el desarrollo de la investigación, se ha identificado que los ahorros energéticos tienen un peso muy relevante en los resultados ambientales y económicos, por lo que están contemplados en el ACV y CCV, por lo que no se requiere se incorpore al multicriterio una dimensión adicional. Adicionalmente, cabe destacar que reducir la optimización a dos variables (ambiental y económica), presenta la ventaja de simplificar el proceso de optimización. Por ello, y salvo que uno de los objetivos establecidos para la selección de las estrategias de rehabilitación sea evaluar explícitamente el consumo energético como variable independiente, se ha decidido que la determinación de las estrategias más adecuadas se va a realizar combinando los resultados del ACV y CCV.

La valoración monetaria de impactos ambientales hace que esta combinación sea sencilla, dado que se ambos resultados se expresan en valores monetarios. Esta monetización tiene la ventaja de que se pueden sumar los resultados, simplificando aún más la toma de decisiones. Sin embargo, en la propuesta planteada no se estima

conveniente, dado que según cuál sea el objetivo de la rehabilitación y quienes sean los actores involucrados en ella, pueden tener mayor peso los factores ambientales o económicos. Por ejemplo, si se trata de una administración pública que quiere adaptar esta metodología para establecer los criterios en las ayudas de rehabilitación, un parámetro de interés puede ser conseguir los mayores ahorros ambientales. En cambio, si la rehabilitación se va a llevar a cabo en un edificio cuyos propietarios limitan el coste de inversión debido a la escasez de recursos, será este parámetro el que condicione la elección.

Hasta ahora, la forma en que se ha estudiado el comportamiento energético, ambiental y económico de la rehabilitación ha discrepado. Cuando se estudia el comportamiento energético de las medidas de rehabilitación, el análisis se ha limitado a la comparación de los ahorros energéticos debidos a las distintas soluciones (Gaterell y McEvoy, 2005a; Mata et al., 2013b; Paiho et al., 2013). Del mismo modo, cuando se estudia la rehabilitación energética desde el punto de vista económico, se busca la rentabilidad de las soluciones de rehabilitación. En este sentido, el CCV es una metodología ampliamente empleada para calcular los costes y los beneficios de la rehabilitación (Hasan et al., 2008; Byman y Jernelius, 2012; Desogus et al., 2013; Gaterell y McEvoy, 2005b; Goodacre et al., 2002).

En el ACV, tradicionalmente se han evaluado los impactos que se generan durante todo el ciclo de vida del edificio. Sin embargo, algunos autores empiezan ya a valorar los impactos evitados debido a la rehabilitación (Nemry et al., 2010; Beccali et al., 2013). Esta aproximación, que en el ámbito energético y económico está ya interiorizada, se ha querido aplicar en la optimización multicriterio planteada. Adicionalmente, y dado que generalmente las viviendas con mayores necesidades de rehabilitación se encuentran en los barrios más vulnerables, el coste de inversión es un parámetro importante en la toma de decisiones. Al mismo tiempo, y como ya se ha visto en el estado de la cuestión, a medida que se producen mayores reducciones energéticas debido a la rehabilitación, el resto de fases del ciclo de vida, y en especial la fase previa al uso del edificio, cobra mayor relevancia. Por ello, adoptar esta aproximación al estudio del comportamiento ambiental del edificio ayudaría no sólo a poder combinar los resultados ambientales con los económicos, sino también a evaluar si la rehabilitación es rentable desde el punto de vista ambiental.

Generalmente, cuando se aplica un método optimización multicriterio no existe una única solución. Marler y Arora (2004), recomiendan el método de Pareto, de acuerdo al cual, las opciones de una población considerada son óptimas si no hay una opción que mejore un objetivo sin empeorar simultáneamente al menos otro.

El concepto se ilustra en la Figura 3.10, donde se quiere minimizar el objetivo f_1 (p. ej. coste de inversión) y maximizar el objetivo f_2 (p. ej. ahorros de ciclo de vida). La opción D es mejor que la opción G ya que tiene un menor coste de inversión ($f_1(D) < f_1(G)$) y uno mayores ahorros de ciclo de vida ($f_2(D) > f_2(G)$). La opción D y F, en cambio, tienen los mismos ahorros de ciclo de vida ($f_2(D) = f_2(F)$), sin embargo, el punto F requiere una inversión mayor. Por consiguiente, la opción D es mejor que la opción F. Sin embargo, al comparar las opciones A y B, no se puede establecer cuál es mejor, puesto que la opción A requiere menor inversión ($f_1(A) < f_1(B)$), sin embargo, la opción B consigue mayores ahorros de ciclo de vida ($f_2(B) > f_2(A)$). Todas las soluciones que se sitúen a la derecha y debajo de otras soluciones, se excluyen con el fin de obtener la curva de Pareto.

Figura 3.10. Principio de optimización de Pareto para la minimización de un objetivo (f_1) y maximización del otro (f_2). Fuente: elaboración propia.

Los objetivos que se quieren alcanzar a la hora de seleccionar las medidas de rehabilitación son, por un lado, que el impacto ambiental y el coste de inversión sean mínimos, y por el otro, conseguir los máximos ahorros ambientales y económicos durante el ciclo de vida. Para poder seleccionar los escenarios de rehabilitación óptimos, se han planteado los siguientes objetivos:

- Mínima inversión ambiental (IE), máximos ahorros de ciclo de vida ambientales (LE).
- Mínima inversión económica (IF), máximos ahorros de ciclo de vida económicos (LF).
- Mínima inversión económica (IF), máximos ahorros de ciclo de vida ambientales (LE).

Los resultados considerados en el análisis ambiental, son los impactos monetizados, también denominados costes ambientales. Por consiguiente, los impactos ambientales monetizados debido a las etapas de producto y rehabilitación, se denominan “inversión ambiental” en la presente investigación.

3.3.7. Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad permiten reducir las incertidumbres que presentan estas metodologías con periodos de análisis tan amplios. La realización de un análisis de sensibilidad de los parámetros más inciertos puede ayudar a mitigar las limitaciones del ACV y CCV, testando el impacto de las variaciones de las hipótesis clave en los resultados (Moore y Morrissey, 2014). Para empezar, y tanto en el ACV como el CCV, la vida útil condiciona los resultados. En principio, cuanto mayor es la vida útil considerada, se espera que los ahorros económicos sean mayores (Moore, 2014). Por otro lado, los valores de monetización presentan un cierto nivel de incertidumbre. Por ello, se debe valorar cómo afecta el uso de los valores inferiores y superiores de la monetización, de acuerdo a los valores presentados en la Tabla 3.7.

Por otro lado, Moore y Morrissey (2014) detectaron en sus resultados que la tasa de descuento tiene un impacto importante en el valor actual neto. Como ya se explicaba anteriormente, la Comisión Europea recomienda una tasa de descuento entre el 2% y el 4% para proyectos de rehabilitación. Por ello, se recomienda tomar estos valores en el análisis de sensibilidad.

El incremento del precio de la energía también es muy relevante e incierto al mismo tiempo, dado que es imposible predecir cómo va a evolucionar en periodos de tiempo tan extensos. El análisis de sensibilidad permite evaluar cómo afecta a los resultados, la variación de la hipótesis adoptada para dicha variable. En la presente investigación, las tasas de incremento que se plantean son menores a la establecida a partir de los datos de EUROSTAT. Se ha optado por esta opción porque cuanto mayor sea el incremento del precio de la energía, mayores serán los ahorros y, por tanto, los beneficios también. Sin embargo, ésta es una época muy cambiante y es preciso plantearse qué pasaría si el incremento del precio de la energía no es tan elevado como ha sido los últimos años, e incluso, si llega a igualarse al IPC. Por ello, se plantean dos escenarios:

- Un escenario en el que el incremento del precio de la energía es igual al IPC y por tanto el incremento real es 0%,
- Un escenario de crecimiento intermedio para gas y electricidad, siendo la tasa de incremento del 1,75% y 2,5% respectivamente.

3.4. Conclusiones

De la investigación abordada, se ha podido confirmar que son numerosas las metodologías existentes para la evaluación de las soluciones de rehabilitación. Sin embargo, tal y como ha quedado recogido en el capítulo anterior, son pocas las investigaciones que consideran simultáneamente el análisis ambiental y económico desde la perspectiva del Ciclo de Vida.

La revisión crítica realizada, que aborda el estudio de 42 investigaciones que incorporan el Enfoque de Ciclo de Vida en la evaluación de la rehabilitación residencial, ha permitido detectar algunas inconsistencias metodológicas, que reducen la comparabilidad de los resultados obtenidos en los distintos estudios, poniendo de manifiesto la necesidad de armonización. Esta revisión ha permitido identificar las hipótesis ya consensuadas a nivel científico e incorporarlas en la metodología propuesta. Con el fin de evitar inconsistencias, debe definirse la unidad funcional y los límites del sistema por igual para el ACV y CCV. En relación a las categorías de impacto ambiental analizadas, la revisión ha puesto de manifiesto la gran variedad de categorías consideradas, así como la falta de uniformidad en los métodos de cálculo utilizados. En este sentido, cabe destacar que el Comité de Normalización Europeo CEN-TC/350 (UNE-EN 15804+A1, 2014; UNE-EN 15978, 2012), en un intento de armonización, establece el método de cálculo y las categorías de impacto ambiental a analizar.

A pesar de que la Norma europea (UNE-EN 15804+A1, 2014; UNE-EN 15978, 2012) recomiende los indicadores de impacto *mid-point* o de efecto intermedio, se ha puesto de manifiesto que una multiplicidad de puntuaciones de impactos individuales dificulta la posibilidad de combinar estos resultados con los indicadores económicos. Por ello, se propone el uso de la valoración monetaria para expresar, en términos económicos, cómo se ve afectado el bienestar de las generaciones actuales y futuras por los impactos ambientales causados por las actividades sociales y económicas de un grupo de personas que repercuten sobre otro, sin que el primer grupo tenga plenamente en cuenta de dicha repercusión (European Commission, 2008). Este método se ha considerado el más adecuado para la agregación holística y transparente de los impactos ambientales.

Por último, los objetivos de optimización multicriterio planteados, han permitido seleccionar las soluciones más adecuadas, en función del objetivo de la rehabilitación, tratando de conseguir los máximos ahorros ambientales y económicos de ciclo de vida, con un coste ambiental y económico inicial mínimos.

3.5. Bibliografía

AGUILERA, R.F., EGGERT, R.G., CC, G.L. y TILTON, J.E., 2012. Is Depletion Likely to Create Significant Scarcities of Future Petroleum Resources? *Non-Renewable Resource Issues*. Springer, pp. 45-82. ISBN 9048186781.

AGUILERA, R.F., EGGERT, R.G., LAGOS CC, G. y TILTON, J.E., 2009. Depletion and the future availability of petroleum resources. *The Energy Journal*, pp. 141-174. ISSN 0195-6574.

AHLROTH, S., 2014. The use of valuation and weighting sets in environmental impact assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 85, pp. 34-41. ISSN 09213449. DOI 10.1016/j.resconrec.2013.11.012.

AKTAS, C.B. y BILEC, M.M., 2012. Impact of lifetime on US residential building LCA results. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, no. 3, pp. 337-349. ISSN 0948-3349. DOI 10.1007/s11367-011-0363-x.

ALLACKER, K., 2010. *Sustainable Building: The development of an evaluation method*. Doctoral dissertation, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.

ALLACKER, K. y DE NOCKER, L., 2012. An Approach for Calculating the Environmental External Costs of the Belgian Building Sector. *Journal of industrial ecology*, vol. 16, no. 5, pp. 710-721. ISSN 1088-1980. DOI 10.1111/j.1530-9290.2011.00456.x.

ALLACKER, K. y DE TROYER, F., 2013. Moving Towards a More Sustainable Belgian Dwelling Stock: the Passive Standard As the Next Step? *Journal of Green Building*, vol. 8, no. 2, pp. 112-132. ISSN 1552-6100. DOI 10.3992/jgb.8.2.112.

ALLACKER, K., DEBACKER, W., DELEM, L., DE NOCKER, L., DE TROYER, F., JANSSEN, A., PEETERS, K., SERVAES, R., SPIRINCKX, C. y VAN DESSEL, J., 2013. *Environmental Profile of Building elements*. Mechelen. Disponible en: <http://www.ovam.be>.

ALLACKER, K. y TROYER, F. de, 2012. Optimisation of the environmental and financial cost of two dwellings in belgium. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, vol. 7, no. 2, pp. 186-208. ISSN 1743-7601. DOI 10.2495/SDP-V7-N2-186-208.

ALWAER, H., SIBLEY, M. y LEWIS, J., 2008. Different Stakeholder Perceptions of Sustainability Assessment. *Architectural Science Review*, vol. 51, no. January, pp. 48-59. ISSN 00038628. DOI 10.3763/asre.2008.5107.

AMSTALDEN, R.W., KOST, M., NATHANI, C. y IMBODEN, D.M., 2007. Economic potential of energy-efficient retrofitting in the Swiss residential building sector: The effects of policy instruments and energy price expectations. *Energy Policy*, vol. 35, no. 3, pp. 1819-1829. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2006.05.018.

ANTHOFF, D., HEPBURN, C. y TOL, R.S.J., 2009. Equity weighting and the marginal damage costs of climate change. *Ecological Economics*, vol. 68, no. 3, pp. 836-849. ISSN 09218009. DOI 10.1016/j.ecolecon.2008.06.017.

ANTIPOVA, E., BOER, D., GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G., CABEZA, L.F. y JIMÉNEZ, L., 2014. Multi-Objective Optimization coupled with Life Cycle Assessment for Retrofitting Buildings. *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 92-99. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.07.001.

ARROW, K.J., CROPPER, M.L., GOLLIER, C., GROOM, B., HEAL, G.M. y NEWELL, R.G., 2012. How should benefits and costs be discounted in an intergenerational context? The views of an expert panel. Resources for the future. . Discussion paper 12–53). [Consulta: 2 mayo 2015]. Disponible en: [http:// www. rff. org/RFF/Documents/RFF-DP-12-53. pdf](http://www.rff.org/RFF/Documents/RFF-DP-12-53.pdf).

ASSIEGO DE LARRIVA, R., CALLEJA RODRÍGUEZ, G., CEJUDO LÓPEZ, J.M., RAUGEI, M. y FULLANA I PALMER, P., 2014. A decision-making LCA for energy refurbishment of buildings: Conditions of comfort. *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 333-342.

ASTE, N., ANGELOTTI, A. y BUZZETTI, M., 2009. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 11, pp. 1181-1187. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.06.005.

BALLARINI, I. y CORRADO, V., 2012. Analysis of the building energy balance to investigate the effect of thermal insulation in summer conditions. *Energy and Buildings*, vol. 52, pp. 168-180. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.06.004.

BAUMANN, H. y TILLMAN, A.M., 2004. *The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application*. Lnd (Suecia): Studentlitteratur.

BECCALI, M., CELLURA, M., FONTANA, M., LONGO, S. y MISTRETTA, M., 2013. Energy retrofit of a single-family house: Life cycle net energy saving and environmental benefits. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 283-293. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2013.05.040.

BEN, H. y STEEMERS, K., 2014. Energy retrofit and occupant behaviour in protected housing: A case study of the Brunswick Centre in London. *Energy and Buildings*, vol. 80, pp. 120-130. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.05.019.

BIN, G. y PARKER, P., 2012. Measuring buildings for sustainability: Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home – The REEP House. *Applied Energy*, vol. 93, pp. 24-32. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2011.05.055.

BROEKX, S., MEYNAERTS, E., VERCAEMST, P. y BEHEYDT, D., 2008. Selecting cost-

effective abatement measures to achieve good water status with the Environmental Costing Model. *Belgian Environmental Economics Day*.

BROWN, N.W.O., MALMQVIST, T., BAI, W. y MOLINARI, M., 2013. Sustainability assessment of renovation packages for increased energy efficiency for multi-family buildings in Sweden. *Building and Environment*, vol. 61, pp. 140-148. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2012.11.019.

BRUYN, S. De, KORTELAND, M., DAVIDSON, M. y BLES, M., 2010. Shadow Prices Handbook. Valuation and weighting of emissions and environmental impacts. Disponible en: http://www.ce.nl/?go=home.downloadPub&id=1032&file=7788_defMainReportMaKMV_1271765427.pdf.

BURATTI, C., MORETTI, E., BELLONI, E. y COTANA, F., 2013. Unsteady simulation of energy performance and thermal comfort in non-residential buildings. *Building and Environment*, vol. 59, pp. 482-491. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2012.09.015.

BYMAN, K. y JERNELIUS, S., 2012. The economics of renovation projects with energy-related investments. . Stockholm. Disponible en: <http://www.stockholm.se/energicentrum>.

CAMPBELL, C.J., 2002. Forecasting global oil supply 2000–2050. *Hubbert Center Newsletter 2002/3, Colorado School of Mines, Golden*.

CELLURA, M., DI GANGI, A., LONGO, S. y ORIOLI, A., 2013a. An Italian input–output model for the assessment of energy and environmental benefits arising from retrofit actions of buildings. *Energy and Buildings*, vol. 62, pp. 97-106. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.02.056.

CETINER, I. y EDIS, E., 2014. An environmental and economic sustainability assessment method for the retrofitting of residential buildings. *Energy and Buildings*, vol. 74, pp. 132-140. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.01.020.

COMISIÓN EUROPEA, 2012. Directrices que acompañan al Reglamento Delegado (UE) n° 244/2012 de la Comisión, de 16 de enero de 2012, que complementa la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética de los edificios, estableciendo un marco metodológico comparativo para calcular los niveles óptimos de rentabilidad de los requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios y de sus elementos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, vol. C 115, pp. 1- 28.

COMMISSARIAT GÉNÉRAL DU PLAN, 2005. Révision du taux d'actualisation des investissements publics.

CONSOLI, F., 1993. *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice*. Sesimbra (Potugal): SETAC-Europe.

CRAWFORD, R.H., 2009. Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield. *Renewable and Sustainable Energy*

Reviews, vol. 13, no. 9, pp. 2653-2660. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2009.07.008.

DE ANGELIS, E., DOTELLI, G., PITTAU, F., LA TORRE, A., PORCINO, C., PANSA, G. y VILLA, N., 2013. LCA and LCC based Energy Optimization of Building Renovation Strategies. En: A. PASSER, K. HÖFLER y P. MAYDL (eds.), *International Sustainable Building Conference*. Graz: pp. 77-86. DOI 10.3217/978-3-85125-299-6.

DE NOCKER, L., 2010. Actualisering van de externe milieuschadetekosten (algemeen voor Vlaanderen) met betrekking tot luchtverontreiniging en klimaatverandering, Studie uitgevoerd in opdracht van VMM, MIRA. www.milieurapport.be.

DE NOCKER, L. y DEBACKER, W., 2015. Annex: update monetisation of the MMG method (2014). Mechelen.

DEBACKER, W., ALLACKER, K., DE TROYER, F., JANSSEN, A., DELEM, L., PEETERS, K., NOCKER, L. De, SPIRINCKX, C. y VAN DESSEL, J., 2012. Milieugerelateerde materiaalprestatie van gebouw- elementen. Mechelen. Disponible en: http://www.ovam.be/sites/default/files/FILE1349102121400ovor121001_MMG_eindrappo rt.pdf.

DEBACKER, W., ALLACKER, K., SPIRINCKX, C., GEERKEN, T. y DE TROYER, F., 2013. Identification of environmental and financial cost efficient heating and ventilation services for a typical residential building in Belgium. *Journal of Cleaner Production*, vol. 57, pp. 188-199.

DESOGUS, G., DI PILLA, L., MURA, S., PISANO, G.L. y RICCIU, R., 2013. Economic efficiency of social housing thermal upgrade in Mediterranean climate. *Energy and Buildings Buildings*, vol. 57, pp. 354-360. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.11.016.

DHILLON, B.S., 1989. *Life Cycle Costing: Techniques, Models and Applications*. New York: Gordon and Breach.

DIXIT, M.K., FERNÁNDEZ-SOLÍS, J.L., LAVY, S. y CULP, C.H., 2010. Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 8, pp. 1238-1247. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.02.016.

DIXIT, M.K., FERNÁNDEZ-SOLÍS, J.L., LAVY, S. y CULP, C.H., 2012. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 3730-3743. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2012.03.021.

DODOO, A., GUSTAVSSON, L. y SATHRE, R., 2010. Life cycle primary energy implication of retrofitting a wood-framed apartment building to passive house standard. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, no. 12, pp. 1152-1160. ISSN 09213449.

DOI 10.1016/j.resconrec.2010.03.010.

DREYER, L.C., HAUSCHILD, M.Z. y SCHIERBECK, J., 2006. A framework for social life cycle impact assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 11, no. 2, pp. 88-97. ISSN 0948-3349. DOI 10.1065/lca2005.08.223.

ECOINVENT CENTRE, 2010. *The ecoinvent version 2.2 database*. Disponible en: <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-2/ecoinvent-version-2.html>.

EDENHOFER, O., KNOPF, B., BARKER, T., BAUMSTARK, L., BELLEVRAT, E., CHATEAU, B., CRIQUI, P., ISAAC, M., KITOUS, A. y KYPREOS, S., 2010. The economics of low stabilization: model comparison of mitigation strategies and costs. *The Energy Journal*, pp. 11-48. ISSN 0195-6574.

ERLANDSSON, M. y LINDFORS, L.G., 2003. On the possibilities to apply the result from an LCA disclosed to public. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 8, no. 2, pp. 65-73. ISSN 1614-7502. DOI 10.1007/BF02978429.

EUROPEAN COMMISSION, 2005. *ExternE Externalities of Energy. Methodology 2005 Update*. ISBN 9279004239.

EUROPEAN COMMISSION, 2008. ExternE—Externalities of energy. A research project of the European Commission. Disponible en: www.ExternE.info.

EUROSTAT, 2009a. Electricity prices for domestic consumers - bi-annual data (until 2007). [Consulta: 20 abril 2015]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>.

EUROSTAT, 2009b. Gas prices for domestic consumers - bi-annual data (until 2007). [Consulta: 20 abril 2015]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>.

EUROSTAT, 2015a. Electricity prices for domestic consumers - bi-annual data (from 2007 onwards). [Consulta: 20 abril 2015]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>.

EUROSTAT, 2015b. Gas prices for domestic consumers - bi-annual data (from 2007 onwards). [Consulta: 20 abril 2015]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>.

FOUQUET, M., LEVASSEUR, A., MARGNI, M., LEBERT, A., LASVAUX, S., SOUYRI, B., BUHÉ, C. y WOLOSZYN, M., 2015. Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. *Building and Environment*, vol. 90, pp. 51-59. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2015.03.022.

GALVIN, R. y SUNIKKA-BLANK, M., 2013. Economic viability in thermal retrofit policies:

Learning from ten years of experience in Germany. *Energy Policy*, vol. 54, pp. 343-351. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2012.11.044.

GARCÍA-ERVITI, F., ARMENGOT-PARADINAS, J. y RAMÍREZ-PACHECO, G., 2015. El análisis del coste del ciclo de vida como herramienta para la evaluación económica de la edificación sostenible. Estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, vol. 67, no. 537, pp. eo56.

GATERELL, M.R. y MCEVOY, M.E., 2005a. The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings. *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 9, pp. 982-995. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.12.015.

GATERELL, M.R. y MCEVOY, M.E., 2005b. The impact of energy externalities on the cost effectiveness of energy efficiency measures applied to dwellings. *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 10, pp. 1017-1027. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.12.004.

GOEDKOOP, M., HEIJUNGS, R., HUIJBREGTS, M., DE SCHRYVER, A. y STRUIJS, J., 2013. *Description of the ReCiPe methodology for Life Assessment Impact Assessment*. Retrieved March.

GOEDKOOP, M., HOFSTETTER, P., MÜLLER-WENK, R. y SPRIEMSMA, R., 1998. The ECO-indicator 98 explained. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 3, no. 6, pp. 352-360. ISSN 1614-7502. DOI 10.1007/BF02979347.

GOODACRE, C., SHARPLES, S. y SMITH, P., 2002. Integrating energy efficiency with the social agenda in sustainability. *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 1, pp. 53-61.

GORGOLEWSKI, M., 1995. Optimising renovation strategies for energy conservation in housing. *Building and Environment*, vol. 30, no. 4, pp. 583-589.

GOULDER, L.H. y WILLIAMS, R.C., 2012. The choice of discount rate for climate change policy evaluation. *Climate Change Economics*, vol. 03, no. 04, pp. 1250024. ISSN 2010-0078. DOI 10.1142/S2010007812500248.

GREENE, D.L., HOPSON, J.L. y LI, J., 2006. Have we run out of oil yet? Oil peaking analysis from an optimist's perspective. *Hong Kong Editorial Board meeting presentations*, vol. 34, no. 5, pp. 515-531. ISSN 0301-4215. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2005.11.025>.

GREN, I.-M., 2008. Cost and benefits from nutrient reductions to the Baltic Sea. *Swedish Environmental Protection Agency*, ISSN 03014797. DOI 10.1006/jema.1997.0137.

GUERRA SANTIN, O., ITARD, L. y VISSCHER, H., 2009. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 11, pp. 1223-1232. ISSN 03787788. DOI

10.1016/j.enbuild.2009.07.002.

GUERRA-SANTIN, O. y ITARD, L., 2010. Occupants' behaviour: determinants and effects on residential heating consumption. *Building Research & Information*, vol. 38, no. 3, pp. 318-338. ISSN 0961-3218. DOI 10.1080/09613211003661074.

HASAN, A., VUOLLE, M. y SIRÉN, K., 2008. Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. *Building and Environment*, vol. 43, no. 12, pp. 2022-2034. ISSN 0360-1323. DOI 10.1016/j.buildenv.2007.12.003.

HERTWICH, E.G. y HAMMITT, J.K., 2001. A decision-analytic framework for impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 6, no. 5, pp. 265-272. ISSN 1614-7502. DOI 10.1007/BF02978787.

HOLLAND, M., PYE, S., JONES, G., HUNT, A. y MARKANDYA, A., 2013. The ALPHA Benefit Assessment Model.

IDAE, 2009a. CALENER-GT: Grandes edificios terciarios. Manual de Referencia. Madrid.

IDAE, 2009b. Condiciones de aceptación de Procedimientos alternativos a LIDER y CALENER. Madrid.

IDAE, 2012. Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3. *Calificación de Eficiencia Energética de Edificios*. Madrid.

IDAE, 2014. Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso de energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España.

IEA, 2000. *Experience curves for energy technology policy*. Paris: OECD/IEA.

IEA, 2004. *World Energy Outlook 2004*. Paris: OECD/IEA.

INE, 2015. Índices de precios de materiales de la construcción y nacionales de la mano de obra. [Consulta: 20 mayo 2004]. Disponible en: www.ine.es.

IPPC, 2007. IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. [Consulta: 5 mayo 2014]. Disponible en: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml.

ISO 15686-5, 2008. *Buildings and constructed assets -- Service-life planning -- Part 5: Life-cycle costing*.

ITSUBO, N., 2002. Impact assessment based on the damage of safeguard subjects indicators and methodology for human health workshop report. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 7, no. 3, pp. 178. ISSN 1614-7502. DOI 10.1007/BF02994056.

JAKOB, M., JOCHEM, E. y CHRISTEN, K., 2002. *Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen in Wohngebäuden*. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.

- JAKOB, M. y MADLENER, R., 2004. Riding down the experience curve for energy-efficient building envelopes: the Swiss case for 1970–2020. *International Journal of Energy Technology and Policy*, vol. 2, no. 1/2, pp. 153-178.
- KAATZ, E., ROOT, D.S., BOWEN, P.A. y HILL, R.C., 2006. Advancing key outcomes of sustainability building assessment. *Building Research and Information*, vol. 34, no. 4, pp. 308-320. ISSN 0961-3218. DOI 10.1080/09613210600724608.
- KELFKENS, G., BREGMAN, A., GRUIJL, F.R., VAN DER LEUN, J.C., PIQUET, A., VAN OIJEN, T., GIESKES, W.W.C., VAN LOVEREN, H., VELDEERS, G.J.M., MARTENS, P. y SLAPER, H., 2002. Ozone layer-climate change interactions . Influence on UV levels and UV related effects. .
- KHASREEN, M.M., BANFILL, P.F.G. y MENZIES, G.F., 2009. Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. *Sustainability*, vol. 1, no. 3, pp. 674. ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su1030674.
- KIRK, S.J. y DELL'ISOLA, A.J., 1995. *Life cycle costing for design professionals*. New York: McGraw-Hill.
- KLOEPFFER, W., 2008. Life Cycle Sustainability Assessment of Products (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p.95). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 13, no. 2, pp. 89-95. DOI <http://dx.doi.org/10.1065/lca2008.02.376>.
- KORZHENEVYCH, A., DEHNEN, N., BRÖCKER, J., HOLTKAMP, M., MEIER, H., GIBSON, G., VARNA, A. y COX, V., 2014. Update of the Handbook on External Costs of Transport. *Final Report*, no. 1, pp. 139.
- KOUSKY, C., KOPP, R.E. y COOKE, R.M., 2011. Risk premia and the social cost of carbon: a review. *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, vol. 5.
- KUIK, O., BRANDERA, L., NIKITINAA, N., NAVRUD, S., MAGNUSSEN, K. y EL HADJI, F., 2008. A Database of Studies on Energy-related External Costs due to Land Use Changes, Acidification and Eutrophication, Visual Intrusion and Climate Change. Delivery of FP6 Cases Project. .
- LANGSTON, Y.L. y LANGSTON, C.A., 2008. Reliability of building embodied energy modelling: an analysis of 30 Melbourne case studies. *Construction Management and Economics*, vol. 26, no. 2, pp. 147-160. DOI 10.1080/01446190701716564.
- LOWE, J., 2008. *Intergenerational wealth transfers and social discounting: Supplementary Green Book guidance*. London: HM Treasury. ISBN 978-1-84532-419-3.
- MAHLIA, T.M.I., SAID, M.F.M., MASJUKI, H.H. y TAMJIS, M.R., 2005. Cost-benefit analysis and emission reduction of lighting retrofits in residential sector. *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 6, pp. 573-578. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.08.009.

MARLER, R.T. y ARORA, J.S., 2004. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 26, no. 6, pp. 369-395. ISSN 1615147X. DOI 10.1007/s00158-003-0368-6.

MATA, É., SASIC KALAGASIDIS, A. y JOHNSON, F., 2013b. Energy usage and technical potential for energy saving measures in the Swedish residential building stock. *Energy Policy*, vol. 55, pp. 404-414. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2012.12.023.

MENZIES, G.F., TURAN, S. y BANFILL, P.F.G., 2007. Life-cycle assessment and embodied energy: a review. *Construction Materials*, vol. 160, no. 4, pp. 135-143.

MEQUIGNON, M., ADOLPHE, L., THELLIER, F. y AIT HADDOU, H., 2013. Impact of the lifespan of building external walls on greenhouse gas index. *Building and Environment*, vol. 59, pp. 654-661. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2012.09.020.

MOORE, T., 2014. Modelling the through-life costs and benefits of detached zero (net) energy housing in Melbourne, Australia. *Energy and Buildings*, vol. 70, pp. 463-471. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.11.084.

MOORE, T. y MORRISSEY, J., 2014. Lifecycle costing sensitivities for zero energy housing in Melbourne, Australia. *Energy and Buildings*, vol. 79, pp. 1-11. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.04.050.

MULLALY, C., 1998. Home energy use behaviour: a necessary component of successful local government home energy conservation (LGHEC) programs. *Energy Policy*, vol. 26, no. 14, pp. 1041-1052. ISSN 03014215. DOI 10.1016/S0301-4215(98)00046-9.

NAUCLÉR, T. y ENKVIST, P., 2009. Pathways to a low-carbon economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve. *McKinsey & Company*, pp. 192. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2010.01.047.

NDCF, 2007. The hidden costs of oil, an update.

NEMRY, F., UIHLEIN, A., COLODEL, C.M., WETZEL, C., BRAUNE, A., WITTSTOCK, B., HASAN, I., KREISSI, J., GALLON, N., NIEMEIER, S. y FRECH, Y., 2010. Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs. *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 7, pp. 976-984. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.01.009.

OCHLEN, S. y PUTZEIJS, B., 2010. *Milieubeleidskosten: begrippen en berekeningsmethoden*. Departement Leefmilieu, Natuur en Energie.

ORTIZ-RODRÍGUEZ, O., CASTELLS, F. y SONNEMANN, G., 2010. Life cycle assessment of two dwellings: one in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. *The Science of the total environment*, vol. 408, no. 12, pp. 2435-43. ISSN 1879-1026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2010.02.021.

OSTERMEYER, Y., WALLBAUM, H. y REUTER, F., 2013. Multidimensional Pareto optimization as an approach for site-specific building refurbishment solutions applicable for life cycle sustainability assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, no. 9, pp. 1762-1779. ISSN 0948-3349. DOI 10.1007/s11367-013-0548-6.

OTT, W., BAUR, M. y KAUFMANN, Y., 2006. NEEDS - New Energy Externalities Developments for Sustainability.

OUYANG, J., LU, M., LI, B., WANG, C. y HOKAO, K., 2011a. Economic analysis of upgrading aging residential buildings in China based on dynamic energy consumption and energy price in a market economy. *Energy Policy*, vol. 39, no. 9, pp. 4902-4910. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2011.06.025.

OUYANG, J., WANG, C., LI, H. y HOKAO, K., 2011b. A methodology for energy-efficient renovation of existing residential buildings in China and case study. *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 9, pp. 2203-2210. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.05.005.

OWENS, J. y WILHITE, H., 1988. Household energy behavior in Nordic countries—an unrealized energy saving potential. *Energy*, vol. 13, no. 12, pp. 853-859. ISSN 03605442. DOI 10.1016/0360-5442(88)90050-3.

PAIHO, S., HEDMAN, Å., ABDURAFIKOV, R., HOANG, H., SEPPONEN, M., KOUHIA, I. y MEINANDER, M., 2013. Energy saving potentials of Moscow apartment buildings in residential districts. *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 706-713. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2013.07.084.

PAPADOPOULOS, A.M., THEODOSIOU, T.G. y KARATZAS, K.D., 2002. Feasibility of energy saving renovation measures in urban buildings. *Energy and Buildings*, vol. 34, no. 5, pp. 455-466.

PEARCE, D., 2003. The Social Cost of Carbon and its Policy Implications. *Oxford Review of Economic Policy*, vol. 19, no. 3, pp. 362-384. DOI 10.1093/oxrep/19.3.362.

PERKINS, F., 1994. *Practical cost benefit analysis. Basic concepts and applications*. South Melbourne, Australia: MacMillan.

PEUPORTIER, B., THIERS, S. y GUIAVARCH, A., 2013. Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, vol. 39, pp. 73-78. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.08.041.

PIKE, R. y DOBBINS, R., 1986. *Investment decisions and financial strategy*. Hemel Hempstead, UK: Philip Allan.

PIZZOL, M., WEIDEMA, B., BRANDÃO, M. y OSSET, P., 2015. Monetary valuation in Life Cycle Assessment: a review. *Journal of Cleaner Production*, vol. 86, pp. 170-179.

ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2014.08.007.

POMBO, O., RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, vol. 123, pp. 88-100. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.06.137.

PREISS, P. y KLOTZ, V., 2008. *NEEDS - New Energy Externalities Developments for Sustainability*. ISBN 9279004239.

REITINGER, C., DUMKE, M., BAROSEVICIC, M. y HILLERBRAND, R., 2011. A conceptual framework for impact assessment within SLCA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, no. 4, pp. 380-388. ISSN 0948-3349. DOI 10.1007/s11367-011-0265-y.

RISHOLT, B., TIME, B. y HESTNES, A.G., 2013. Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings based on energy, economy and home quality indicators. *Energy and Buildings*, vol. 60, pp. 217-224. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.12.017.

RIVELA, B., 2012. *Propuesta metodológica de aplicación sectorial de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la evolución ambiental de la edificación en España*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

SELIGMAN, C., DARLEY, J.M. y BECKER, L.J., 1978. Behavioral approaches to residential energy conservation. *Energy and Buildings*, vol. 1, no. 3, pp. 325-337. ISSN 03787788. DOI 10.1016/0378-7788(78)90012-9.

SEPPÄLÄ, J. y HÄMÄLÄINEN, R.P., 2001. On the meaning of the distance-to-target weighting method and normalisation in Life Cycle Impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 6, no. 4, pp. 211-218. ISSN 1614-7502. DOI 10.1007/BF02979376.

SPADARO, J. V. y RABL, A., 2008. Estimating the uncertainty of damage costs of pollution: A simple transparent method and typical results. *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 28, no. 2-3, pp. 166-183. ISSN 01959255. DOI 10.1016/j.eiar.2007.04.001.

STEEMERS, K. y YUN, G.Y., 2009. Household energy consumption: a study of the role of occupants. *Building Research & Information*, vol. 37, no. 5-6, pp. 625-637. DOI 10.1080/09613210903186661.

STEG, L., 2008. Promoting household energy conservation. *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4449-4453. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2008.09.027.

STEPHAN, A., CRAWFORD, R.H. y DE MYTTENAERE, K., 2012. Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings. *Energy and Buildings*, vol. 55, pp. 592-600. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.09.008.

STERN, J., 2010. The new security environment for European gas: worsening geopolitics and increasing global competition for LNG.

TAYLOR, P., 2010. Energy Technology Perspectives 2010. *Scenarios & strategies to*, vol. 2050.

UNE-EN 15643-3, 2012. *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 3: Marco para la evaluación del comportamiento social*. Comité de Normalización Europeo, Bruselas.

UNE-EN 15804+A1, 2014. *Sostenibilidad en la construcción - Declaraciones ambientales de producto - Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción*.

UNE-EN 15978, 2012. *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo*.

UNE-EN 16627, 2015. *Sostenibilidad en la obras de construcción. Evaluación del comportamiento económico de los edificios. Métodos de cálculo*.

UNITED STATES GOVERNMENT, 2010. Technical Support Document: Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866.

VAN DEN BERGH, J.C.J.M., 2007. Evolutionary thinking in environmental economics. *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 17, no. 5, pp. 521-549. ISSN 0936-9937.

VERBEECK, G. y HENS, H., 2005. Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable? *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 7, pp. 747-754. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.10.003.

VMM, 2007. Milieuraapport Vlaanderen MIRA-T 2007 Indicatorrapport.

VRIJDEERS, J. y WASTIELS, L., 2013. Nearly Zero Energy Renovation of houses: Life cycle costs and environmental impact. En: A. PASSER, K. HÖFLER y P. MAYDL (eds.), *International Sustainable Building Conference*. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, pp. 87-94. DOI 10.3217/978-3-85125-299-6.

VUUREN, D.P., STEHFEST, E., ELZEN, M.G.J., KRAM, T., VLIET, J., DEETMAN, S., ISAAC, M., KLEIN GOLDEWIJK, K., HOF, A., MENDOZA BELTRAN, A., OOSTENRIJK, R. y RUIJVEN, B., 2011. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change*, vol. 109, no. 1, pp. 95-116. ISSN 1573-1480. DOI 10.1007/s10584-011-0152-3.

WALDHOFF, S., ANTHOFF, D., ROSE, S. y TOL, R.S.J., 2011. The Marginal Damage Costs of Different Greenhouse Gases: An Application of FUND. *Economics*, vol. 8, no. 2015, pp. 0-34. ISSN 1556-5068. DOI 10.2139/ssrn.1974111.

WEBSTER, E. y MACKAY, D., 2003. Defining uncertainty and variability in environmental fate models. *CEMC Report*, no. 200301.

ZABALZA, I., SCARPELLINI, S., ARANDA, A., LLERA, E. y JÁÑEZ, A., 2013. Use of LCA as a tool for building ecodesign. A case study of a low energy building in Spain. *Energies*, vol. 6, no. 8, pp. 3901-3921. ISSN 19961073. DOI 10.3390/en6083901.

Capítulo 4

Definición de los casos de estudio

Definition of the case studies

En el presente capítulo se definen los casos de estudio que permiten ilustrar la metodología propuesta para el análisis multicriterio de las estrategias de rehabilitación y describir los elementos básicos de la hipótesis de partida.

Para ello, se ha definido un tipo de edificio representativo del parque edificado, común a las localidades con distintos climas, y un espectro de escenarios de rehabilitación que responde a diferentes grados de exigencia de demanda energética.

La definición del modelo de edificio se inicia acotando el periodo de construcción del edificio y su contexto climático. A partir de estos dos criterios, se seleccionan las ciudades de análisis y se identifica la tipología más representativa. La definición del edificio se aborda a partir de un análisis urbano, funcional y constructivo de una muestra previamente seleccionada.

Por último, se presentan los escenarios de rehabilitación, planteando objetivos cada vez más restrictivos en términos de demanda energética.

In the present chapter the case studies defined, in order to illustrate the multi-criteria assessment methodology for housing renovation, are described. Moreover, the fundamental elements of the hypothesis are presented.

To do so, a representative housing block from the existing stock, with common features to the cities selected with different climates, has been defined, as well as a range of retrofitting scenarios, which addresses different degrees of energy demand requirements.

The definition of the building model starts from the delimitation of the construction period and the climate context. From these two criteria, assessment cities are chosen and the most representative housing typology is identified. The definition of the building is addressed on the basis of an urban, functional and construction analysis of a previously selected sample.

Finally, renovation scenarios are proposed, setting objectives increasingly stringent in terms of energy demand.

Publicaciones

- **POMBO, O.**, RIVELA, B. y NEILA, J., 2014. Modelo de edificación para el análisis multicriterio de la rehabilitación del parque residencial madrileño de los años 1950-1980. *Miradas a la investigación arquitectónica: construcción, gestión, tecnología - Architectural research findings: building construction, management, technology*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, pp. 412-416. ISBN 978-84-617-0504-7.
- **POMBO, O.**, NEILA, J. y RIVELA, B., 2014. Vivienda de posguerra en España. La rehabilitación como herramienta para una arquitectura más sostenible. *Ambitat*, no.14, pp. 7-13.

4.1. Introducción

Las investigaciones llevadas a cabo para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de los edificios han proliferado notablemente en los últimos años. El reto reside hoy en rehabilitar un tejido específico existente en muchas ciudades de los países industrializados. Este parque edificado es consecuencia de las importantes necesidades cuantitativas de vivienda, existentes al finalizar las guerras de mitad del siglo XX, en un contexto de escasa producción industrializada y de estándares de confort completamente alejados de las demandas mínimas exigibles en la actualidad. Como afirma Arias (2000) en el estudio sobre barrios desfavorecidos, “estos barrios se encuentran en todo tipo de ciudades en que se hayan hecho operaciones públicas para resolver problemas de alojamiento, pero principalmente en ciudades medias y grandes de fuerte crecimiento en las décadas de los cincuenta y sesenta”.

En España, la promoción inmobiliaria de las décadas de los 50, 60 y 70 del siglo XX se caracterizó por un gran número de promociones, polígonos de gran tamaño y un alto número de nuevas viviendas. Por el contrario, en las últimas décadas, si bien ha aumentado el número de promociones, la cantidad de viviendas construidas ha sido menor. En consecuencia, el papel de la gran promoción residencial en los decenios expansionistas de la ciudad es de gran importancia.

Actualmente, el parque edificado en este periodo representa casi la mitad del parque existente, presentando un potencial de mejora en términos de eficiencia energética y emisiones de CO₂ muy relevante.

En este capítulo se aborda la selección y definición de los casos de estudio sobre los que aplicar la metodología planteada, con el fin de poder confirmar la hipótesis de la presente investigación. Para ello, se opta por definir una tipología representativa con el fin de que las conclusiones extraídas a partir de los resultados del estudio puedan ser aplicadas para extraer principios directrices y criterios de carácter más general, aplicables en otros casos, contemplando las limitaciones que todo ejercicio de extrapolación conlleva. Resulta evidente la dificultad de definir un modelo de edificio que represente todo el parque edificado, debido a la complejidad y heterogeneidad del mismo. Por lo tanto, se han ido tomando decisiones que han permitido definir una tipología representativa del parque de viviendas, de acuerdo con los objetivos de la investigación.

En primer lugar, se ha seleccionado el periodo de construcción más representativo del parque residencial así como las distintas zonas climáticas de la península. En base a

estos parámetros, se han seleccionado tres ciudades situadas en las distintas zonas climáticas y con gran construcción de nueva vivienda durante el periodo seleccionado, donde aplicar la metodología: Bilbao, Madrid y Sevilla. Se ha estudiado el parque de viviendas construido en el periodo y localidades seleccionadas, definiendo un modelo de edificio común a las tres ciudades, que si bien no es perfecto, se considera válido para su estudio. En último lugar, se han definido cuatro escenarios de rehabilitación, considerando escenarios cada vez más estrictos, desde la rehabilitación actual, hasta el estándar Passivhaus, pasando por el Código Técnico para rehabilitación y nueva edificación.

4.2. Definición del modelo edificatorio

Como ya se ha mencionado anteriormente, se ha decidido utilizar un modelo de edificio que permita comparar los resultados en las distintas ciudades con climas diferenciados, definiendo un edificio tipo, con cierta representatividad en el parque inmobiliario, y sobre el que es necesario actuar para mejorar su eficiencia energética. A tal efecto, se ha limitado el periodo de estudio, correspondiéndose con el de mayor construcción de viviendas, previo a la normativa NBE-CT 79, y con necesidad de ser rehabilitado en el corto plazo. En este sentido, las décadas de los 50, 60 y 70 del siglo XX se caracterizaron por una gran construcción de viviendas que actualmente representan casi el 50% del parque residencial (Instituto Nacional de Estadística, 2015). Debido a la baja calidad de los materiales y a la inexistencia de estándares térmicos en la edificación, es necesario intervenir en dichos edificios para adaptarlos a las condiciones de confort requeridos en la actualidad.

Para poder entender mejor cómo fue el desarrollo de la vivienda y acotar el periodo de estudio, se ha realizado un repaso de los planes de vivienda que se sucedieron con el fin de paliar el chabolismo y el hacinamiento que sufrieron las principales ciudades con desarrollo industrial. La tabla 4.1 resume las políticas de vivienda en España durante las décadas de los 50, 60 y 70.

El Primer Plan de Vivienda (1944-1954), cuyo objetivo fue reducir la tasa de desempleo e impulsar la actividad económica, resultó insuficiente para paliar el problema de la falta de alojamiento, ya que se financiaron viviendas a las que sólo podían acceder familias con ingresos altos, consolidando la clase media propietaria y favoreciendo los intereses de promotoras, constructoras e inmobiliarias (Muñoz Fernández, 2006; Rueda y Tamames, 2008). El problema del chabolismo, la infravivienda, el hacinamiento y el subarrendamiento fue una realidad en las ciudades con desarrollo industrial como Madrid, Barcelona, Sevilla, Valencia, Vizcaya, Oviedo, Zaragoza, Campo de Gibraltar y Málaga. Ejemplo de esa situación fueron los poblados dirigidos y de absorción creados a partir de 1954. El Programa de Viviendas de Renta Limitada, que refunde los anteriores programas de viviendas protegidas y bonificadas, así como el II Plan Nacional de la Vivienda 1956-1960, que no cumplió con sus previsiones, no fueron capaces tampoco de resolver la escasez de alojamiento (Pérez Barrasa et al., 2011).

Tabla 4.1. Políticas de la vivienda en España. Fuente: elaboración propia a partir de Moza González (1983) y Blos (1999).

DÉCADA	CONTEXTO SOCIAL, POLÍTICO Y ECONÓMICO	POLÍTICA ECONÓMICA Y URBANA	POLÍTICA DE VIVIENDA SOCIAL (NACIONAL)
50	Concentración de la producción industrial. Flujo Migratorio intenso.	1956: Aprobación de la Ley del Suelo.	1944-1954: I Plan Nacional de la vivienda. 1954: Creación de las Viviendas de Renta Reducida y Mínima y de las de Renta Limitada. 1955: II Plan Nacional de la Vivienda. 1957: Creación del Ministerio de Vivienda. Ley de viviendas subvencionadas (impulso de la promoción privada). Plan de Urgencia Social en Madrid. 1958: Plan de Urgencia Social en Barcelona, Vizcaya y Asturias.
60	Fuertes migraciones interregionales.	1960: Aprobación de la ley de Propiedad Horizontal. 1964: I Plan de Desarrollo Económico. 1968: II Plan de Desarrollo Económico.	1961: III Plan Nacional de la Vivienda. 1963: Creación de las Viviendas de Protección Oficial (VPO). 1968: Reglamento de Viviendas de Protección Oficial crea el régimen de Acceso Diferido a la Propiedad.
70	Crisis del petróleo. Tendencia estacionaria y/o regresiva de inmigración.	1970: Creación del Instituto Nacional de la Urbanización. 1972: III Plan de desarrollo Económico.	

La vivienda de promoción pública ha tenido un gran peso en este período de la expansión, especialmente en Madrid, laboratorio y fábrica de los barrios de promoción pública, con un total de 65.000 viviendas repartidas en 70 promociones. En 1957, ante la imposibilidad del Estado de resolver el déficit de viviendas, se crean las “viviendas subvencionadas” incentivando la participación de la iniciativa privada (Moya González, 1983).

El año 1959 supone un punto de inflexión. El gobierno español aprueba el Plan Nacional de Estabilización Económica, cuyo objetivo fue la estabilización y la liberalización de la economía española. Esto supuso la ruptura con la política de autarquía y posibilitó el inicio de una época de crecimiento económico en el país durante los años 60, iniciando

el periodo del *Desarrollismo*¹. Este periodo provocó, entre otros efectos, un auténtico *boom* urbanístico en las zonas con mayor nivel de desarrollo.

El III Plan Nacional de la Vivienda (1961-1976) fue concebido como un programa para la ejecución de viviendas que atendieran las necesidades y que aumentara la productividad de la industria de la construcción y, por primera vez, con una concepción urbanística de la vivienda, integrándola en una estructura espacial organizada, coordinando todas las actividades y entidades públicas con competencia en el desarrollo y ejecución del Plan. La Ley previó penalizar las viviendas desocupadas, modificar la legislación del suelo y de arrendamientos urbanos y descongelar las rentas. Sin embargo, se realizó una estimación deficiente de los efectos de las migraciones, no estimuló la oferta de suelo urbanizable, ni racionalizó los recursos, de modo que no se cumplieron las previsiones y sus programas cuatrienales fueron absorbidos posteriormente por los Planes de Desarrollo.

Durante el periodo de 1976 a 1980, la política de vivienda se desarrolla en un contexto de escasez de recursos financieros, que trató de resolverse con la Ley 2/81 de Regulación del Mercado Hipotecario. La regulación sobre Viviendas de Protección Oficial (VPO) que se promulga establece un referente para los planes de viviendas posteriores.

Los crecimientos de vivienda, los recursos económicos y la implicación de la promoción pública y privada no han sido similares a lo largo de estas tres décadas. Para que el estudio sea viable, es necesario acotar el periodo de estudio a la década más significativa por su con mayor volumen de construcción residencial. La Figura 4.1 recoge el número de viviendas construidas por década, en las principales ciudades con desarrollo industrial en esta época. En el caso de Bilbao, se evalúa el área metropolitana del Gran Bilbao ya que, debido a la difícil topografía, el asentamiento urbano tuvo lugar no sólo en Bilbao sino en las localidades adyacentes, principalmente en la margen izquierda de la ría donde se produjo el desarrollo industrial.

¹ La definición del concepto de "*Desarrollismo*" que refleja la Real Academia Española (RAE) remite al ámbito ideológico: *Ideología que propugna el desarrollo meramente económico como objetivo prioritario*. A pesar de que no resulta fácil fechar con exactitud el inicio y el fin de la época desarrollista, una serie de acontecimientos producidos entre 1956 y 1957 permiten situar su inicio en torno a estos años y darla por culminada con el inicio del cambio político que se produjo tras la muerte de Franco en 1975 (Lizundia Uranga, 2012).

Figura 4.1. Número de viviendas según año de construcción en las principales ciudades con desarrollo industrial durante el desarrollismo. Fuente: elaboración propia a partir del Censo de Población y viviendas 2011 (Instituto Nacional de Estadística, 2015).

Como se observa en la Figura 4.1, y como ya se remarcaba en el repaso de las políticas de vivienda, la década de los 60 fue la década de mayor construcción, sobre todo en la ciudad de Madrid. Por tanto, es esta década sobre la que se centrará la investigación.

4.2.1. Selección de ciudades

La selección de las ciudades de estudio se ha hecho principalmente en base al tipo de clima. El CTE-DB HE establece doce zonas climáticas en la Península Ibérica, pero la selección de doce casos de estudio no resulta operativa, puesto que dificulta el desarrollo de la metodología y la búsqueda de un modelo de edificio común a doce ciudades. Así pues, se ha tomado como referencia la clasificación climática definida por el Instituto Geográfico Nacional (2015), que establece tres climas principales, tal y como queda reflejado en la Figura 4.2. Los climas subtropical y montañoso se han descartado del análisis, ya que son climas minoritarios y las localidades con mayor crecimiento de vivienda durante el periodo de estudio no se sitúan en estos climas. Se ha seleccionado una localidad por cada tipo climático respondiendo, de manera adicional, a distintos grados de severidad climática en el CTE (Figura 4.2):

- Madrid: ciudad que mayor población acogió en esta época, donde se urbanizaron 13.000 hectáreas. Pertenece a la zona climática D3 del CTE-DB HE1, por lo que tiene una severidad climática media-alta en invierno y en verano.

- Bilbao: el desarrollismo significó para el País Vasco y más concretamente para el Gran Bilbao un momento de crecimiento de enormes proporciones. La demanda de mano de obra fue respondida por una auténtica avalancha de trabajadores, que acompañados de sus familias abarrotaron las localidades industriales como Santurce, Portugalete, Sestao, Barakaldo, Erandio, Basauri, o el propio Bilbao. Pertenece a la zona climática C1 del CTE-DB HE1, por lo que tiene una severidad climática media en invierno y baja en verano.
- Sevilla: a pesar de no ser la ciudad con más población, se ha elegido esta localidad por su alta severidad climática en verano. Sevilla acogió un alto número de inmigrantes en esta época. Además, debido a las inundaciones de 1961, necesitó construir un gran número de viviendas en poco tiempo. Pertenece a la zona climática B4 del CTE-DB HE1, por lo que tiene una severidad climática media-baja en invierno y alta en verano.

Figura 4.2. Selección de las ciudades a estudiar en función del tipo de clima (izda.) y la zona climática (dcha.). Fuente: elaboración propia a partir de los mapas climáticos del Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Fomento y CTE-DB HE1.

4.2.2. Estudio tipológico de parque residencial de los años 60

La fuerte expansión superficial de esta época tiene rasgos uniformes en morfología y promoción (Figura 4.3), al haberse producido mayoritariamente a base de grandes conjuntos de edificación homogénea y haber sido construidos bajo la gestión unitaria de grandes promotores que desarrollaban el planeamiento en polígonos compensatorios. Su construcción fue tanto pública como privada, levantados por la administración pública, a través de organismos diversos, o por la iniciativa privada conformada por un amplio

espectro de agentes, mayoritariamente de particulares y pequeñas compañías constructoras y, en menor número, por inmobiliarias de diversas categorías.

Los cambios producidos tanto a nivel tipológico como a nivel de materiales y soluciones constructivas no fueron extraordinarios durante el periodo desarrollista. La lenta evolución de las escasas normativas urbanísticas y ordenanzas edificatorias, los intereses y urgencias constructivas de los promotores, y las distintas administraciones y un desarrollo tecnológico limitado que no acababa de dar un salto cualitativo, fueron las causas de que los edificios construidos durante estos años presenten muchas similitudes.

Figura 4.3. Moratalaz, Madrid (superior), vista aérea años 60; vista de los Remedios en 1963 (inferior izquierda), Sevilla; Otxarkoaga, Bilbao (inferior derecha) Boletín Estadística Villa de Bilbao, A.M.B., 1962. Fuentes: Máquez (2012), Valero Ramos y Díaz Amela (2007) y Bilbao Larrondo (2008).

Madrid fue la ciudad que más población absorbió, que contó con más de 50.000 chabolas, sin mencionar los problemas de infravivienda, hacinamiento y realquiler que generaron zonas de deterioro urbano de difícil solución. Desde mediados de los años cuarenta hasta la mitad de los años ochenta unas 13.000 hectáreas fueron urbanizadas y construidas, eso sí, con ritmos distintos según las distintas fases del proceso de construcción de estos años. Gran parte de esta superficie fue ocupada por barrios de infraviviendas y de pisos, construidos por la administración pública y las inmobiliarias entre 1955 y 1975. La vivienda de promoción pública tuvo un gran peso en este periodo de la expansión, mas, no fue menor la actividad de la iniciativa privada.

En el caso de Bilbao, el análisis debe extenderse a la provincia. La difícil topografía, unida al desigual crecimiento de las zonas industriales y agrícolas, obligaron a concentrar el 75% de la población de Vizcaya en los 28 municipios que comprende la comarca del “Gran Bilbao”, con una extensión de 412 km². El crecimiento demográfico operado en la provincia, alimentado en gran medida por un intenso flujo migratorio, provocó un incremento espectacular de la densidad de la población vizcaína. La margen izquierda fue quien sufrió en mayor medida este aumento de la densidad de su población. En este sentido, Santurce y Portugalete multiplicaron casi por cinco su densidad desde 1940 a 1970. En el caso de este último municipio, la densidad se duplicó cada diez años desde la década de los años 50 hasta la de los 70. El aumento de la población fue absorbido casi en un 90% por los municipios de Bilbao, Barakaldo, Portugalete, Santurce, Basauri, Ermua, Getxo y Sestao, es decir, por poblaciones de 20 a 100.000 habitantes, cinco de las cuales fueron focos de asentamientos claramente industriales, mientras tan sólo uno de ellos (Getxo) era una tradicional zona residencial (Pérez Pérez, 2001).

El área metropolitana del Gran Bilbao asistió a la proliferación de un fenómeno que, con ciertas diferencias, fue común a todas las grandes capitales españolas que ejercieron como focos de recepción de inmigrantes: la construcción incontrolada de barrios periféricos sin ningún tipo de planificación ni organización. Aunque Vizcaya había visto crecer a lo largo de su industrialización grandes zonas de viviendas obreras, no fue hasta los años 60 cuando este tipo de construcción desordenada desborda todas las previsiones. Las laderas de los montes que circundan Bilbao y su comarca fueron urbanizadas sin el más mínimo respeto por aquellos constructores que, al calor de la falta de control gubernamental, comenzaron a hacer uno de los grandes negocios especulativos de este siglo. Las propuestas de la iniciativa privada de capital vizcaíno, llegarían a plantear análogos discursos constructivos tanto en Madrid y otras ciudades españolas como en Bilbao (Bilbao Larrondo, 2008).

La promulgación de leyes específicas por parte del Estado en sus diversas modalidades (Planes de urgencia social, Ley del Suelo, Ordenes conjuntas para las empresas, etc.) carecieron de una verdadera operatividad, por cuanto a pesar de ser desarrolladas de forma parcial no pudieron en ningún caso atender a la creciente demanda de viviendas. Por el contrario, en muchas ocasiones esta legislación terminó por beneficiar a la iniciativa privada, amparando grandes operaciones especulativas. En no pocas ocasiones coincidían quienes formaban parte de la clase político-empresarial bilbaína, tanto en los consejos de algunas de las inmobiliarias vizcaínas que actuarían en la provincia con una mayor actividad, como en los de las grandes inmobiliarias, que lo harían en Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla o Málaga (Bilbao Larrondo, 2008).

Al igual que en otras ciudades del país, a partir de los años 50, Sevilla recibe un número elevado de inmigrantes que se asientan en los poblados periurbanos. Esto unido a la degradación de la vivienda en los barrios históricos y la situación de emergencia creada por las inundaciones de 1961, conforman un panorama de escasez de vivienda ante el que los poderes públicos se ven obligados a intervenir (Guerrero Mayo y López Igual, 2012).

La etapa 1957-1979 que se inicia con la creación de los primeros enclaves productivos y termina con la transición política, se inserta en uno de los periodos de mayor crecimiento poblacional de la ciudad de Sevilla y conlleva el comienzo del desarrollo de su actual planta. El Plan General de Ordenación Urbana de 1963, de corte marcadamente desarrollista, califica amplias zonas de la ciudad como uso residencial intensivo. Durante su vigencia se desarrollaron los tres macro polígonos de la ciudad (Norte, Sur y San Pablo) y se consolidó la primera periferia obrera como “solución final” al problema del hacinamiento y chabolismo, en la que la iniciativa privada descubre el mercado de la vivienda obrera de mano de la subvención pública (Díaz, 2010). Asimismo, se asiste al crecimiento de la primera corona metropolitana vinculado, sobre todo, al desarrollo industrial, siendo constante la migración de establecimientos industriales desde el centro urbano, y conformándose los primeros polígonos industriales de naturaleza metropolitana (Almoguera Sallent, 2008).

4.2.2.1. Tipologías residenciales

La opción clara en el diseño urbano de esta época es la de las supermanzanas con bloques edificatorios abiertos, creando espacios interbloque más o menos arbolados. La composición volumétrica se decide en función de la topografía o de mecanismos de seriación. Las tipologías encontradas en los barrios de promoción pública son muy diversas. Predomina el bloque lineal de doble crujía de 3, 4 y 5 plantas, pero también se dan bloques de cuatro o cinco crujías de 5 a 12 plantas, bloques de doble crujía en dúplex con galería, de 5 a 12 plantas, bloques en forma de T y L, en general adosadas, de diversas alturas, viviendas unifamiliares con jardín, adosadas en hilera, de una o dos plantas y, por último, torres en H de 9 a 12 plantas, adosadas o exentas. En los barrios de promoción privada predomina también el bloque abierto y las supermanzanas, pero a diferencia de las anteriores, se alcanzan densidades muy altas. Predominan, por tanto, las agrupaciones lineales o quebradas de bloques en “H” y torres en altura conectadas por sus vértices, que permiten construir un número de viviendas muy superior (Figura 4.4).

Figura 4.4. Diseño urbano y tipologías en los barrios de promoción pública y privada de Madrid.
Fuente: elaboración propia.

Como consecuencia de la creación en 1957 de las viviendas subvencionadas que incentivan la participación de la iniciativa privada, y fruto de los planes de Desarrollo Económico, aumenta significativamente la construcción de viviendas en las principales ciudades españolas y de manera más significativa en la capital, que sigue recibiendo fuertes migraciones interregionales. Con el fin de identificar cuáles son las tipologías edificatorias más representativas de estos polígonos de viviendas, en el presente estudio se ha realizado un análisis sistematizado, mediante fichas resumen, de los barrios de Madrid construidos entre 1957 y 1970 (Anexo A). A partir del “Análisis Urbanístico de Barrios Vulnerables”, realizado por Hernández Aja et al. (2013), se ha comprobado que las tipologías representativas en Madrid, también lo son en Sevilla y Bilbao,

Entre 1957 y 1970, se han identificado en Madrid 32.482 viviendas de promoción pública, divididas en 14 promociones con densidades que oscilan entre 64 y 160 viv/Ha. El análisis realizado permite observar una gran variación tipológica, con bloques de 2, 3 y 5 crujías y con alturas que varían entre 4 y 6 plantas para los bloques y entre 10 y 14 plantas para las torres. Pese a esta diversidad tipológica, se identifica claramente que el bloque lineal de doble crujía con 2 viviendas por planta y 5 pisos es el predominante (Tabla 4.2). En cuanto a la orientación, se trata de viviendas de doble orientación, ya que lo que se buscaba era la ventilación cruzada por temas higiénicos y la correcta iluminación. No se puede establecer una orientación dominante, puesto que los bloques se situaban adaptándose al terreno existente, predominando este criterio al de una orientación adecuada.

En este mismo período la iniciativa privada llevó a cabo cerca de 90.000 viviendas. A pesar de que algunas de estas viviendas no tenían ningún tipo de bonificación, gran parte eran viviendas de renta limitada o de renta limitada subvencionada. La información

existente sobre los barrios de promoción privada es escasa, ya que al no ser de promoción pública los proyectos de estos edificios no se encuentran en los archivos regionales. Gracias al estudio realizado por Rodríguez Chumillas (2001), ha resultado posible identificar y analizar 66.461 viviendas distribuidas en 15 promociones. El objetivo de la iniciativa privada es obtener mayor rendimiento económico, por lo que se alcanzan densidades mayores, superando las 200 viv/Ha en algunos barrios. Para conseguir dichas densidades, se recurre a los bloques en “H”, bloques de 5 crujías con 4 viviendas por planta. El número de pisos también aumenta (Tabla 4.3).

Con las cifras anteriores y el análisis del parque edificado durante este período queda demostrada la relevancia de las promociones de iniciativa privada en el parque residencial existente, especialmente la tipología en “H”, de la que se han contabilizado 50.246 viviendas frente a las 28.976 que suponen la tipología de bloque lineal de doble crujía con 2 viviendas por planta. En cuanto a la altura de los edificios la variedad es muy amplia, por lo que con el estudio realizado no es posible abordar su definición. Destacan los bloques de 5 alturas y los bloques mayores de 8 alturas. El “Análisis Urbanístico de Barrios Vulnerables”, realizado por Hernández Aja et al. (2013), ha permitido comprobar que esta tipología es igualmente característica de las ciudades de Bilbao y Sevilla, por lo que finalmente se ha seleccionado la tipología en “H” como tipología representativa.

Tabla 4.2. Barrios de promoción pública en Madrid (1957-1970). Fuente: elaboración propia.

DENOMINACIÓN	AÑO	NÚMERO VIVIENDAS							CARACTERÍSTICAS				DENSIDAD (viv/Ha)	
		TOTAL	BLOQUE LINEAL (2V/P)	BLOQUE LINEAL DÚPLEX	BLOQUE EXENTO (4/P)	"H" (4V/P)	4 (V/P)	"Y" (6 /P)	TORRE (4V/P)	OTROS	ALTURA	CRUJÍAS		O. P.
Barrio de Entrevías San Cristóbal de los Ángeles Colonia Virgen de Loyola Barrio de Manoteras	1957/66	5.688	2.724	-	792	620	660	892	-	-	4,5,8,10,12	2 y 5	NE-SO	79,9
	1958-1967	4.175	4.175	-	-	-	-	-	-	-	5, 6, 10	2	N-S	133
	1958-1962	762	-	-	-	-	762	-	-	-	4	2	N-S	74
	1961-1963	830	830	-	-	-	-	-	-	-	5	2	NO-SE NE-SO	131,75
Poblado Gran San Blas	1959-1974													
Poblado Gran San Blas (D)	1958-1962	1.686	1.686	-	-	-	-	-	-	-	3,4,5,6	2	E-O	159,25
Poblado Gran San Blas (E)	1958-1962	1.083	1.083	-	-	-	-	-	-	-	4,5,6	2	E-O	97,66
Poblado Gran San Blas (F)	1958-1962	2.641	1.842	168	135	440	-	-	-	56	1, 4, 5, 7	2 y 5	E-O	155,9
Poblado Gran San Blas (G)	1958-1962	2.074	715	78	-	-	1.281	-	-	-	2, 4, 5, 7	2 y 5	N-S	157
Barrio El Salvador	1959-1962	320	-	-	320	-	-	-	-	-	5	5	N-S	
Barrio de Moratalaz	1962-1964	600	-	-	-	-	-	-	-	600	9	3		64,04
U.V.A. Virgen de Begoña para el I.N.V.	1959-1966	1.411	740	-	176	495	-	-	-	-	5	2	NE-SO	74
Viviendas del INV para la Cooperativa Sociedad General de Autores	1966-1969	1.520	-	-	-	1.520	-	-	-	-	10, 15	5	NE-SO	
Barrio de La Elipa														
Conjunto de viviendas de la OSH al sur de la Elipa Elipa 2º Fase Colonia Caño Roto San Vicente Paul	1959-1965	1.166	550	-	-	616	-	-	-	-	5, 14	2 y 5	E-O	184
	1961-1970	972	80	-	-	160	-	-	80	-	5, 10	2 y 5	E-O	116
	1963-1964	1.648	1.240	-	-	-	-	-	-	408	5, 6	2 y 5	NS	85,5
	1961	2.034	861	1.116	-	-	-	-	-	57	2, 4, 5, 7	2 y 5	NO-SE	139,6
Barrio de San Antonio o Cuartel de la Montaña	1961-1964	2.456	1.520	-	-	320	-	-	456	160	5, 15, 18	2, 3 y 5	NO-SE	115,5
Perpetuo Socorro	1962	1.416	1.416	-	-	-	-	-	-	-	4, 5	2	NO-SE NE-SO	171,82
TOTAL		32.482	19.462	1.362	1.423	4.171	2.703	892	536	1.281	5	2		

Tabla 4.3. Barrios de promoción privada en Madrid (1957-1970). Fuente: elaboración propia.

DENOMINACIÓN	AÑO	NÚMERO VIVIENDAS								CARACTERÍSTICAS				DENSIDAD (viv/Ha)
		TOTAL	BLOQUE LINEAL (2V/P)	BLOQUE LINEAL DÚPLEX	BLOQUE EXENTO (4/P)	"H" (4V/P)	4 (V/P)	"Y" (6 /P)	TORRE (4V/P)	OTROS	ALTURA	CRUJÍAS	O. P.	
Ciudad de los Ángeles	1956-1968	7.185	-	-	-	-	-	-	-	-	5 - 12	2, 5	-	151,3
Colonia de Orisa	1959-1964	400	360	40	-	-	-	-	-	-	5, 8	2	N-S	-
Barrio de la Estrella	1957-1963	4.192	784	-	-	1.932	276	-	1.200	-	5,8,9,10, 11,12,15	2, 5	NO-SE	181,9
San Juan Bautista	1958	1.400	360	-	-	560	-	-	480	-	6, 13	2, 5	NE-SO NO-SE	93,26
Parque de las Avenidas	1963	4.536	210	-	-	4.270	-	-	56	-	5 - 11	2, 5	N-S NE- SO E-O	136,3
Ciudad Parque Aluche	1960-64	18.688	4.828	-	-	10.820	624	492	1.824	100	3 - 13	2, 5	N-S E-O	131,6
Barrio del Pilar/ Conjunto Altamira/ Conjunto Iberia	1960	19.641	72	-	-	16.993	2.576	-	-	-	4,5,6,10, 11,12,13, 14, 15	2, 5	N-S E-O	213,6
Grupo Juan XXIII. Colonia del Hogar del Empleado	1962-1966	502	-	402	100	-	-	-	-	-	5, 7	3	N-S E-O	200,8
Ciudad de los Poetas o Colonia Sacontia	1964/1970	2.900	2.900	-	-	-	-	-	-	-	5, 7	2	N-S E-O	116
Barrio Blanco	1963-1968	264	-	-	-	256	-	-	-	-	8	5	NE-SO	105,6
Moratalaz	1959	20.952	-	-	-	-	-	-	-	-	6 y 9	5	N-S NE-SO E-O	144,4
San Ignacio de Loyola	1964	5.400	-	-	-	4.220	-	-	1.180	-	5, 10	5	N-S	180
Colonia Parque Europa	1965	2.264	-	-	-	2.264	-	-	-	-	9	5	-	301,9
Barrio de Nueva Esperanza	1965-1970	3.393	-	-	-	-	-	-	1.053	2.340	5, 17	-	NE-SO NO-SE	-
Conjunto Residencial Santa Eugenia	1968	4.760	-	-	-	4.760	-	-	-	-	10	5	N-S E-O	106,5
TOTAL		66.461	9.514	442	100	46.075	3.476	492	5.793	2.440	-	5	-	-

4.2.2.2. Caracterización del bloque en “H” de los años 60

En esta época, Madrid fue el laboratorio de ensayo para el desarrollo de la vivienda, cuyas tipologías se replicaron en el resto de ciudades del Estado. Debido a la limitación del trabajo, se ha seleccionado un amplio espectro de edificios con tipologías en “H” de los barrios madrileños de los años 60. Previamente al análisis de los edificios, se han establecido los indicadores urbanos, funcionales y constructivos a partir de los cuales se podrá obtener un modelo de edificio. Cada decisión tomada en cada indicador ha sido contrastada con la casuística de Bilbao y Sevilla, señalando las confluencias y divergencias encontradas.

Desde el punto de vista urbano, se analiza la relación del edificio en la parcela, estudiando la separación entre edificios, número de plantas y la relación entre ancho de calle y altura de edificio. Así, se obtiene un ratio que permitirá establecer, en función de la altura del edificio, la anchura interbloques. En el ámbito funcional, el estudio parte de las dimensiones básicas (fondo edificatorio, patios, elementos de comunicación, etc.), examinando el programa en planta baja y plantas de pisos y analizando en mayor profundidad el esquema funcional de la vivienda tipo, así como las superficies construidas y útiles de las viviendas y de cada estancia. Por último, bajando al nivel constructivo se definen los sistemas constructivos empleados en cubiertas, fachadas, forjados, y estructura.

Tabla 4.4. Indicadores analizados para definir el modelo. Fuente: elaboración propia.

Indicadores urbanos	Indicadores funcionales	Indicadores constructivos
Año	Usos	Estructura
Entorno	Esquema plantas	Fachada
Número de plantas	Dimensiones (fondo edificatorio, patios,)	Cubierta
Ratio ancho calle/altura edificios	Programa	Solera
	Superficies útiles y construidas	

Para cada edificio, se han desarrollado unas fichas individuales que recogen el análisis de los indicadores propuestos en la Tabla 4.4, y que se pueden consultar en el Anexo B. Con la información obtenida de este análisis previo, se han elaborado unas fichas comparativas que permiten obtener los datos necesarios para poder definir todos los indicadores del modelo. Igualmente, se hace un diagnóstico de los edificios seleccionados, con el fin de conocer las posibles patologías existentes en estos edificios, y un estudio termográfico que permitirá profundizar en estas patologías.

4.2.2.3. Estudio comparativo de los edificios seleccionados

Los edificios analizados se sitúan todos ellos en Madrid, utilizándose como base para el estudio de definición del modelo, por su carácter laboratorio, verificando que las hipótesis resultan representativas en Bilbao y Sevilla. Se trata de bloques de promoción privada, todos ellos viviendas de renta limitada. Los bloques se sitúan en San Juan Bautista, Moratalaz, San Ignacio de Loyola, Parque de las Avenidas, Aluche, Ciudad de los Ángeles y Barrio del Pilar (Figura 4.5).

Figura 4.5. Selección de edificios analizados. Fuente: elaboración propia a partir de fotos aéreas de Bing Maps.

Análisis Urbano

- **Nº de plantas**

A medida que la década de los sesenta avanza y debido al interés de las constructoras e inmobiliarias por obtener el mayor beneficio de las viviendas construidas, el número de plantas aumenta. Así en la primera mitad de la década predominan los bloques de 5 alturas, mientras que en la segunda lo hacen los de 10. Al no predominar ninguna, y

dado que en esta época los edificios de hasta 5 alturas no disponían de ascensor, “la altura máxima permitida para viviendas de renta limitada sin ascensor, desde la rasante de la acera a la planta respectiva será de 14 m” (Capa Herrán y Herrero Lozano, 1964, p. 4), se descarta que el edificio sea de 5 alturas ya que la accesibilidad supondría una variable más que analizar, quedando fuera del objeto de estudio.

Con el fin de comprobar las alturas predominantes en Madrid, Bilbao y Sevilla, se ha recurrido a los datos del Censo de Población y Viviendas (Instituto Nacional de Estadística, 2015), a partir de los cuales se han relacionado los años de construcción y el número de viviendas en relación con la altura del edificio. Como se observa en la Figura 4.6, tanto en Madrid como en Bilbao predominan los bloques de más de 8 plantas de altura. En Sevilla, predomina el bloque de 5 alturas, sin embargo el bloque con más de 8 plantas también tiene una representación en esta década y adquiere mucho mayor protagonismo en la década siguiente. Por lo tanto, se ha considerado que el bloque de 10 alturas es un bloque representativo para las tres ciudades.

Figura 4.6. Número de viviendas según década de construcción y número de plantas del edificio en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir del Censo de Población y viviendas 2011 (Instituto Nacional de Estadística, 2015).

- **Ratio ancho calle / altura edificio**

El ratio obtenido oscila entre 0,7 y 2. A medida que la década avanza, el ratio tiende a disminuir, debido una vez más al incremento de la especulación inmobiliaria. Se descartan los valores inferiores a 1, ya que el Reglamento de Renta Limitada de 1955 establecía que tenía que ser como mínimo 1: “En anchos superiores a ocho metro, casas de altura igual al ancho de calle” (Capa Herrán y Herrero Lozano, 1964). Se establece un ratio intermedio de 1,3.

Análisis Funcional

- **Dimensiones generales**

Los bloques están formados por varios portales (3-5), correspondientes a unidades en “H”, adosadas, bien de manera lineal, bien de forma quebrada. Las esquinas se resuelven de dos maneras: en algunos casos se cierra la esquina, mientras que en otros se mantiene el mismo esquema.

La anchura de patios varía, como se aprecia en el esquema de 4 a 8,3 metros. La normativa establece: “En los edificios que tengan patios interiores regirán las siguientes normas para las dimensiones de los mismos, siendo L el lado menor en metro y S la superficie en metros cuadrados.

Cinco plantas L mínimo: 7m S mínimo: 50m²” (Capa Herrán y Herrero Lozano, 1964).

Estas dimensiones no vienen reflejadas para edificios de viviendas con más de 5 alturas. De la documentación revisada y tras comprobar los parámetros de los proyectos con los exigidos por la Ley de Viviendas de Renta Limitada de 1955, se observa que el control del cumplimiento de la normativa no era muy exhaustivo. En cualquier caso, se considera que el modelo debe cumplir los parámetros estipulados por el Reglamento.

Figura 4.7. Dimensiones de los módulos en "H". Fuente: elaboración propia.

- **Esquema funcional de la vivienda**

Tras analizar estos edificios se observa que el esquema funcional de la vivienda es el mismo que el utilizado para resolver los bloques lineales de 2 viviendas por planta, con ciertas variaciones si se trata de vivienda en esquina, o si varía el número de dormitorios (Figura 4.8). Los edificios estudiados son de 2, 3 y 4 dormitorios.

Figura 4.8. Planta vivienda tipo en Moratalaz (izda.), planta tipo Nuestra Señora de Lourdes, Batán (dcha.). Fuente: Fernández Nieto (2006).

- **Superficies**

Tras analizar individualmente las superficies útiles de las distintas viviendas localizadas en cada barrio (fichas individuales, Anexo B), se han sistematizado los resultados del análisis en un cuadro resumen (Tabla 4.5), descartándose aquellos tipos de viviendas que representaban un número reducido dentro del edificio, ya que se deben a pequeñas modificaciones en términos de superficies útiles y representan un número bajo de viviendas con respecto al total. La tabla recoge dos apartados: viviendas centrales o viviendas tipo y viviendas en esquina, que generalmente incorporan un dormitorio más debido a que aprovechan la superficie del patio.

Se observa que, para el grupo de viviendas centrales, predominan las viviendas de dos dormitorios, que están compuestas por hall, cocina, estar, baño, dos dormitorios y terraza. Las viviendas situadas en las esquinas, por el contrario, integran hall, cocina, estar, baño, tres dormitorios y terraza. Como se ha comentado anteriormente, se debe a que a pesar de tener las mismas proporciones (fondo edificatorio y ancho de fachada) la superficie correspondiente al patio, se le asigna a la vivienda. Por lo que respecta a las dimensiones, la tabla muestra que las superficies útiles de las distintas piezas son muy similares.

Tabla 4.5. Superficies útiles de las viviendas analizadas Fuente: elaboración propia.

VIVIENDAS CENTRALES (VIVIENDAS TIPO)												
Viviendas de 4 dormitorios												
Barrio	Nºviv	S.U.	Hall	Cocina	Estar	Baño	Distrib	D1	D2	D3	D4	Terraza
SJB	60	89,39	3,48	8,7	18,04	4,91	5,5	10,23	10,32	8,22	6,09	7,9
Viviendas de 3 dormitorios												
Barrio	Nºviv	S.U.	Hall	Cocina	Estar	Baño	Distrib	D1	D2	D 3	Terraza	Aseo
MO2	36	59,44	2,21	5	13,41	4,66	1,74	10,02	7,64	6,41	6,74	1,61
SIL	-	57,33	2,76	5,13	18,55	3,07	1,97	10,09	8,31	6,04	4,83	-
CA	90	67,86	1,56	5	16,1	3,5	7,54	10,5	7,92	6,24	9,5	-
Viviendas de 2 dormitorios												
Barrio	Nºviv	S.U.	Hall	Cocina	Estar	Baño	Distrib	D1	D2	Terraza		
MO1	80	43,5	2,5	5	11,45	1,8	1,65	10,5	6	3,6		
SIL	70	48,1	1,65	5,12	16,25	2,77	1,54	10,01	8,03	3,42		
AL	45	58,02	1,25	5,12	18,6	2,44	0,64	10,02	6,03	13,92		
PI1	160	43,81	2,6	5,1	13,76	2,91	1,15	10,48	6,11	3,75		
PI2	144	43,81	1,6	5,17	12,71	1,98	1,4	10,01	6,29	4,65		
VIVIENDAS ESQUINAS												
Viviendas de 3 dormitorios												
Barrio	Nºviv	S.U.	Hall	Cocina	Estar	Baño	Distrib	D1	D2	D3	Terraza	Aseo
MO2	16	67,11	1,25	6,95	18,44	3,82	3,31	10,62	8,11	6,9	6,2	1,51
PI1	40	54,34	3,46	5,17	14,21	3,3	2,7	10,01	8,8	7,28	3,75	-
PI2	36	54,35	2,8	5,45	12,59	2,81	2,61	10,13	7,17	6,14	4,65	-
Viviendas de 2 dormitorios												
Barrio	Nºviv	S.U.	Hall	Cocina	Estar	Baño	Distrib	D1	D2	Terraza		
AL	24	60,45	1,05	5,41	13,2	2,45	4,95	10,4	10,1	12,89		

En la definición del modelo, se ha optado por seleccionar las viviendas de dos dormitorios con una superficie útil de unos 49 m². Las fachadas laterales son continuas, cerrando los patios de estas orientaciones, por lo que las viviendas de las esquinas son viviendas de tres dormitorios con una superficie útil aproximada de 64 m².

Una vez más, se han analizado estos resultados a la luz de los datos estadísticos del Censo de Población y Viviendas (Figura 4.9). Se puede observar que, para la década de

estudio, las tres ciudades coinciden en los mismos rangos de superficie útil, que son coherentes a su vez con la decisión tomada a partir del análisis de casos de estudio de Madrid.

Figura 4.9. Número de viviendas según superficie útil y periodo de construcción en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia a partir del Censo de Población y viviendas 2011 (Instituto Nacional de Estadística, 2015).

• Orientaciones

La Normativa se refiere a las orientaciones que se deben adoptar, señalando: “se intentará conseguir que las estancias estén orientadas hacia el sur o hacia la más favorable localidad y de los terrenos de que se trate; el mayor número de dormitorios deberá orientarse hacia los cuadrantes del Sur y del Este” (Capa Herrán y Herrero Lozano, 1964). Sin embargo, se ha observado que no hay una orientación dominante. Predomina la adaptación al terreno y el aprovechamiento de la parcela. Además, en esta tipología las viviendas son simétricas, por lo que si dos viviendas están correctamente orientadas, las otras dos no lo están. En la definición del modelo se ha considerado finalmente una orientación norte-sur

Análisis constructivo

El escaso desarrollo tecnológico, la falta de investigación y una mano de obra acomodada al uso de soluciones tradicionales, bien conocidas y avaladas por la experiencia, hacen que el abanico de materiales y sistemas constructivos empleados durante todo el periodo sea muy limitado. Su lenta y pausada evolución no se corresponde con el debate que, en torno al mundo de la construcción, se mantuvo en gran parte de Europa.

En esta época no existe una diferenciación significativa entre las diferentes regiones del Estado, utilizándose materiales y técnicas muy similares en todas ellas. Lógicamente, las particularidades de cada una de las tipologías y tradiciones constructivas locales, asociadas a sus respectivas industrias, y la diversidad climática del territorio español hacen que el empleo de determinadas soluciones sea más común en algunas zonas que en otras (Lizundia Uranga, 2012).

- **Cubierta**

En los edificios analizados se encuentran tres tipos de soluciones (Figura 4.10):

- Inclinada: Cubierta de teja (plan o curva) sobre tabiques palomeros.
- Plana no ventilada: Hormigón celular sobre el último forjado (formación de pendientes), impermeabilización y gravilla.
- Plana ventilada (catalana): Tabiquillos (creando una cámara de aire), doble tablero de rasilla y baldosín catalán.

Figura 4.10. Tipos de cubierta utilizados en Madrid durante el periodo 1957-1970. Fuente: elaboración propia a partir de memorias de proyectos.

- **Fachada**

Las soluciones encontradas en fachada muestran una evolución desde la fachada de 1 pie de ladrillo macizo cara vista (en edificios de 5 plantas en los que la estructura es de muros de carga) a la de ½ pie de ladrillo cara vista con cámara de aire y trasdosado de ladrillo hueco (Figura 4.11). Sin embargo, es esta última la que predomina y la que se elige para el modelo a estudiar.

En este sentido, González Moya et al. (2013) afirman que la solución de ½ pie, cámara de aire y tabique de ladrillo hueco sencillo complementada posteriormente con la inclusión de aislamiento en la cámara, gracias sobre todo a las exigencias de ahorro energético contenidas, primero en el Decreto 1490/75 y después en la NBE CT 79, refleja un modo de construir las fachadas que ha tenido una gran difusión como solución arquitectónica hasta la década de 1980.

Figura 4.11. Evolución de la fachada (1957-1970). Fuente: elaboración propia a partir de memorias proyectos.

Esta solución es también muy habitual en el País Vasco donde, salvo en contadas excepciones, se utiliza la solución de doble hoja de fábrica cerámica apoyada sobre el borde de forjado de cada planta y cámara de aire intercalada (Figura 4.12). Los cambios más relevantes se producen en los revestimientos exteriores de acabado, que varían en función de la aparición de nuevos productos y de las modas de cada momento. En los primeros años predominan los revestimientos continuos que, con el tiempo, se combinan con aplacados de todo tipo (cerámicos, vítreos, pétreos, etc.). El ladrillo cara vista adquiere protagonismo a partir de la segunda mitad de los sesenta, convirtiéndose en el material predominante a partir de la entrada en la década de los setenta (Lizundia Uranga, 2012).

Figura 4.12. Variantes de la solución de fachada de doble hoja típica de la época: 1) Hoja exterior de fábrica de ladrillo cara vista ligeramente volada respecto al plano del forjado cuyo frente se chapea con plaqueta, cámara de aire y tabique interior enlucido. 2) Solución similar a la anterior dejando los frentes estructurales vistos. 3) Hoja exterior de fábrica de ladrillo hueco doble colocada a media asta y revestida exteriormente. 4) Se diferencia de la anterior en la disposición del ladrillo hueco doble, realizado en este caso a tabicón. Fuente: Lizundia Uranga (2012).

En cuanto a las carpinterías, en la mayoría de los casos las carpinterías existentes son carpinterías de aluminio con vidrio simple. A lo largo de los años, algunos usuarios han sustituido las ventanas por carpinterías de aluminio con rotura de puente térmico y vidrio doble, carpinterías de PVC, han colocado la doble ventana y en muchos casos mantienen las originales. La casuística es tan diversa que se ha optado por considerar para el modelo de edificio las carpinterías originales.

En el País Vasco, la presencia de carpinterías metálicas durante esta década es menor a las de madera, y no es hasta la década de los setenta cuando se extiende su uso. Algunas de las empresas dedicadas a la fabricación de carpinterías de aluminio con delegaciones comerciales y de asistencia técnica en el País Vasco, además de la vitoriana “URSSA”, eran “Alusud S.A.” que utilizaba perfilería de la marca “Technal”, “MMM” (Manufacturas Metálicas Madrileñas), “Cointra” o “Alusa”. Sin embargo, al igual que otros muchos elementos, la escasa variedad tipológica, formal y dimensional que presentan las carpinterías exteriores de fachada hace que la resolución constructiva del perímetro del hueco sea muy similar en la mayoría de los casos (Lizundia Uranga, 2012).

Figura 4.13. Soluciones de carpinterías exteriores más utilizadas: 1) Ventana de dos hojas abatibles, solución típica para dormitorio. 2) Ventana similar a la anterior con una hoja fija en la parte inferior. 3) Ventana de triple hoja, dos de ellas abatibles, con un fijo común en la parte inferior. Solución muy utilizada en salas de estar y dormitorios principales. 4) Ventana de una hoja para pequeñas estancias como baños y aseos. 5) Puerta balconera de doble hoja, utilizada habitualmente como salida al balcón desde la cocina. 6) Puerta balconera de una hoja con ventanal, típica salida desde la sala de estar. Fuente: Lizundia Uranga (2012).

Estudio termográfico

La falta de aislamiento acarrea numerosos problemas de puentes térmicos (Figura 4.14). El calor se pierde por múltiples lugares. Los puentes térmicos de pilares y forjados son un común a todos los bloques. Asimismo, se aprecian claramente aquellas viviendas que tienen la calefacción funcionando en el momento de la toma de las termografías, ya que gran parte del calor emitido se pierde por el cerramiento. En algunos casos se puede intuir la presencia de hornacinas, haciendo el cerramiento aún más débil desde el punto de vista térmico.

Figura 4.14. Principales deficiencias térmicas encontradas en el estudio termográfico. Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Modelo edificatorio de referencia

Una vez extraídos los resultados del análisis comparativo, se ha definido un modelo de edificio, atendiendo a los parámetros definidos anteriormente, común para Madrid, Bilbao y Sevilla. Se trata de un modelo que, aunque evidentemente no refleja a la perfección el espectro de particularidades en cada una de las tres ciudades, se considera representativo para dichas localidades.

El modelo de edificio es una edificación de 10 plantas, con 120 viviendas de 2 y 3 dormitorios, y una superficie útil de 49 y 64 m², respectivamente. La altura libre de forjado a forjado es de 2,5 m. La cubierta es inclinada, de teja cerámica curva apoyada sobre tablero cerámico, que apoya a su vez sobre tabiques palomeros separados cada 1 m. La fachada es una fachada de doble hoja, de medio pie de ladrillo cara vista, cámara de aire, y tabique sencillo, con guarnecido de yeso al interior. Las ventanas son de aluminio sin rotura de puente térmico, con vidrio sencillo. Las transmitancias térmicas correspondientes a la cubierta, fachada y ventanas son de 1.48 W/m²K, 1.69 W/m²K y 5.7 W/m²K, respectivamente.

En cuanto al diagnóstico realizado, los problemas debido a la falta de aislamiento térmico y como consecuencia, los múltiples puentes térmicos encontrados, son un problema fundamental que es necesario solventar. Como conclusión, el modelo definido servirá como edificio de referencia para estudiar de manera comparativa la eficiencia de distintas soluciones de rehabilitación pudiendo extrapolar, a partir de los resultados obtenidos, criterios y directrices de priorización de estrategias a edificios de similares características.

Figura 4.15. Descripción de los datos urbanos y funcionales del modelo de edificio definido para Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 4.16. Descripción de las propiedades constructivas del modelo de edificio definido para Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

4.3. Escenarios de rehabilitación

En los últimos años, la normativa relativa a la eficiencia energética de los edificios ha incrementado los niveles de exigencia en relación a la limitación de la demanda y el consumo energético. La normativa europea EPBD (Comisión Europea, 2010) establece que los Estados Miembros deberán promover la rehabilitación de los edificios para que sean edificios de consumo de energía casi nulo, si bien no existe una definición clara sobre el concepto “consumo casi nulo”. En España, se acaba de aprobar la definición del edificio de energía casi nulo, pero todavía no se ha establecido cómo se evaluará en la rehabilitación residencial. En la presente investigación se han definido cuatro escenarios, cada vez más restrictivos en cuanto a la demanda energética:

- **Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación**

El escenario de partida, tal y como se ha enunciado en la hipótesis, son las soluciones de rehabilitación que se están empleando en el momento actual. Como ha quedado reflejado en el estado de la cuestión, la rehabilitación energética en España hasta ahora se ha dado fundamentalmente vinculada a programas de ayudas a la rehabilitación. Por ello, se han estudiado los edificios rehabilitados por los programas de ayudas a la rehabilitación en el periodo 2009-2012. Cabe destacar que una de las barreras para este análisis es la ausencia de datos e información fiable sobre estas actuaciones. Pese a que a las administraciones públicas están destinando cada vez más presupuesto a la promoción de la rehabilitación privada, son pocas las que están evaluando cómo de eficaces han sido las actuaciones que se han subvencionado. Gracias a la colaboración de la Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo (EMVS) de Madrid, el Gobierno Vasco, Viviendas Municipales de Bilbao, el Ente Vasco de la Energía (EVE) y la Universidad de Sevilla, que han permitido el acceso y la consulta de los expedientes de concesión de las ayudas, se han podido definir las soluciones actuales de rehabilitación para cada localidad.

- **Escenario E2A: Cumplimiento CTE DB-HE (rehabilitación)**

En la actualización del CTE DB-HE de 2013, se exige que: “en las obras de reforma en las que se renueve más del 25% de la superficie total de la envolvente térmica final del edificio y en las destinadas a un cambio de uso característico del edificio se limitará la demanda energética conjunta del edificio de manera que sea inferior a la del edificio de referencia”. Dado que ya es de obligado cumplimiento, se considera necesario evaluar este escenario.

▪ **Escenario E2B: Cumplimiento CTE DB-HE (nueva edificación)**

A la hora de analizar los programas de ayuda a la rehabilitación de las ciudades seleccionadas se ha observado que para Madrid y Sevilla el requisito para obtener la ayuda es mejorar la transmitancia térmica del edificio cumpliendo, en el caso de Sevilla, o mejorando, en el caso de Madrid, los valores establecidos por el CTE DB-HE 2006, valores asignados actualmente para el cálculo del edificio de referencia del CTE DB-HE (versión 2013). En el caso de Bilbao la exigencia es mayor, dado que se pide alcanzar una “C” en la certificación energética. Por ello, la presente investigación persigue identificar si resultaría pertinente cumplir las exigencias de demanda energética que señala el Código Técnico para nueva edificación, que en función de la zona climática en la que se sitúe el edificio, sería distinta.

Actualmente, la norma limita el consumo de energía primaria, que incluye calefacción, refrigeración y ACS y la demanda de calefacción y refrigeración. Sin embargo, en este estudio sólo se ha considerado la mejora de climatización debida a la rehabilitación, sin tener en cuenta el ACS. Las soluciones incluyen únicamente medidas pasivas de mejora de la envolvente, por lo que se podrá reducir la demanda energética, pero el consumo de energía primaria vendrá condicionada por unos equipos y un tipo de energía que será igual para los cuatro escenarios. Por ello, se ha decidido ajustar las soluciones del escenario en base a la demanda límite.

▪ **Escenario E3: Estándar Passivhaus**

Dado que las políticas energéticas son cada vez más restrictivas, en la presente investigación se ha establecido como uno de los objetivos específicos el comprobar si es factible y eficiente, tanto ambiental como económicamente, llegar a estándares más restrictivos. Adicionalmente, en esta investigación se ha elegido el estándar Passivhaus como referencia para su evaluación, ya que todavía no existen unas exigencias consensuadas para la evaluación de los edificios de consumo de energía casi nulo, y en algún país de Europa así lo han hecho.

Para edificios residenciales existen dos tipos de certificación, el estándar Passivhaus para edificios residenciales y el EnerPHit, para rehabilitación. Un edificio rehabilitado puede optar a los dos sellos, aunque suele optar al segundo porque los requisitos son menores. Sin embargo, se ha descartado el EnerPHit, ya que sus requisitos son menores en Bilbao y Sevilla que el CTE para nueva edificación, por lo que dejaría de ser un escenario más restrictivo que el anterior.

4.4. Conclusiones

A partir de la revisión de la construcción de vivienda en el periodo de la posguerra y los datos estadísticos de vivienda del INE, se ha identificado el periodo de mayor construcción de vivienda, que se corresponde con la década de XX. El análisis del parque construido en Madrid, Bilbao y Sevilla, ha posibilitado definir un modelo de edificio, considerado representativo, común a Madrid, Bilbao y Sevilla, ciudades con climas diferenciados.

El estudio tipológico de la década seleccionada ha permitido identificar las tipologías residenciales que se adoptaron para la construcción de grandes polígonos de vivienda, que trataron de paliar el chabolismo y las grandes necesidades, debido a las fuertes migraciones que sufrieron muchas ciudades a nivel nacional. A partir de la caracterización de los barrios de la década de los 60 en Madrid, que fue un laboratorio de ensayo para la creación de nuevas tipologías de vivienda, se ha identificado el bloque en “H” como la tipología que mayor número de viviendas engloba., a través del “Análisis Urbanístico de Barrios Vulnerables”, realizado por Hernández Aja et al. (2013), ha permitido comprobar que esta tipología es igualmente característica de las ciudades de Bilbao y Sevilla, por lo que finalmente se ha seleccionado la tipología en “H” como tipología representativa.

El análisis sistematizado de los edificios seleccionados en Madrid, ha posibilitado definir un modelo de edificio aunando las características urbanas, funcionales y constructivas, comparando cada elección con la casuística de Bilbao y Sevilla, e identificando las diferencias existentes entre las tres localidades.

De los resultados obtenidos, se ha podido concluir que donde mayor variación existe, es en la altura del edificio y la solución constructiva empleada en cubierta, siendo la altura representativa superior en el caso de Madrid y Bilbao.

En cuanto al análisis funcional, se observa que no hay grandes diferencias entre las tres ciudades.

El análisis constructivo ha mostrado que las diferencias entre las prácticas constructivas de las diferentes localidades analizadas, se manifiestan principalmente en el diseño de la cubierta: en Bilbao, debido a las condiciones climáticas, la solución más utilizada es la cubierta inclinada; en Sevilla, al contrario, es la cubierta plana; y finalmente en Madrid se observa el empleo de ambas soluciones. La composición de la fachada, sin embargo, se ha observado que es muy similar, pese a las diferencias climáticas, careciendo todas

ellas de aislamiento térmico. El estudio termográfico realizado en estos edificios, ha puesto de manifiesto las deficiencias térmicas que presentan y la necesidad de rehabilitación.

4.5. Bibliografía

ALMOGUERA SALIENT, M. del P., 2008. *La ciudad cambia de escala: Sevilla ciudad metropolitana*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Servicio de publicaciones.

ARIAS, F., 2000. Las periferias sociales: los barrios desfavorecidos en las ciudades españolas. *Documentación Social*, vol. 119, pp. 275-294. ISSN 0417-8106.

BILBAO LARRONDO, L., 2008. *El poblado dirigido de Otxarkoaga : Del Plan de Urgencia Social de Vizcaya al Primer Plan de Desarrollo Económico. La vivienda en Bilbao (1959-1964)*. Bilbao: Ayuntamiento de Bilbao.

BLOS, D., 1999. *Los polígonos de vivienda social: Perspectivas hacia su recuperación en España, francia y Brasil*.

CAPA HERRÁN, J. y HERRERO LOZANO, D., 1964. *Viviendas de Protección Oficial (Legislación y Jurisprudencia sistematizadas)*. Madrid: Joker.

COMISIÓN EUROPEA, 2010. Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Boletín Oficial*, vol. L135, pp. 13-35.

DÍAZ, I., 2010. *Sevilla cuestión de clase. Una geografía social de la ciudad*. Sevilla: Atrapasueños.

FERNÁNDEZ NIETO, M.A., 2006. *Las Colonias del Hogar del Empleado. La periferia como ciudad*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

GONZÁLEZ MOYA, M.A., ALONSO, C., MONJO, J. y OTEIZA, I., 2013. Tipología constructiva de fachadas de protección pública en Madrid. Décadas de 1940 a 1980. En: V. AZORÍN, P. CASSINELLO, N. CASSINELLO y Á. SORLÍ (eds.), *Jornadas Internacionales de Investigación en Construcción*. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, pp. E3/F1-4. ISBN 9788472924222.

GUERRERO MAYO, M.J. y LÓPEZ IGUAL, M.P., 2012. Políticas urbanas en la ciudad de Sevilla. *Geopolítica(s). Revista de estudios sobre espacio y poder*, vol. 3, no. 1, pp. 61-81. ISSN 2172-7155. DOI 10.5209/rev_GEOP.2012.v3.n1.38987.

HERNÁNDEZ AJA, A., VÁZQUEZ ESPÍ, M., GARCÍA MADRUGA, C., MATESANZ PARELLADA, Á., MORENO GARCÍA, E., ALGUACIL GÓMEZ, J. y CAMACHO GUTIÉRREZ, J., 2013. Análisis urbanístico de Barrios Vulnerables. *Ciudades para un Futuro más Sostenible*. Disponible en: <http://habitat.aq.upm.es/bbv/>

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL, 2015. El Clima de España. [Consulta: 20 junio 2002]. Disponible en: http://www.ign.es/espmay/clima_bach.htm.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, 2015. Censos de Población y Viviendas 2011. . Disponible en: http://www.ine.es/censos2011_datos/cen11_datos_inicio.htm.

LIZUNDIA URANGA, I., 2012. *La construcción de la arquitectura residencial en Gipuzkoa durante la época del Desarrollismo*. Tesis doctoral. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea.

MÁRQUEZ, R., 2012. Moratalaz, de dehesa a distrito. *Historias Matritenses*. [Consulta: 1 febrero 2016]. Disponible en: <http://historias-matritenses.blogspot.com.es/2012/10/moratalaz-de-dehesa-distrito.html>.

MOYA GONZÁLEZ, L., 1983. *Barrios de promoción oficial: Madrid 1939-1976*. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

MUÑOZ FERNÁNDEZ, F.J., 2006. *Reconstrucción y vivienda. La arquitectura de los años de la posguerra en el País Vasco 1934-1950*. Disponible en: <http://hedatuz.euskomedia.org/3859/1/25033076.pdf>.

PÉREZ BARRASA, T., RODRÍGUEZ COMA, M. y BLANCO MORENO, Á., 2011. Política de gasto en vivienda. España 2010.

PÉREZ PÉREZ, A.J., 2001. El problema de la vivienda en Vizcaya bajo el franquismo. *Vasconia: Cuadernos de historia - geografía*, vol. 31, pp. 243-273.

RODRÍGUEZ CHUMILLAS, I., 2001. *Vivienda y promoción inmobiliaria en Madrid*. Lleida: Departament d'Historia, Universitat de Lleida.

RUEDA, A. y TAMAMES, R., 2008. *Estructura Económica de España*. Madrid: Alianza Editorial.

VALERO RAMOS, E. y DÍAZ AMELA, I., 2007. Reciclaje de barriadas. Una alternativa sostenible. Sevilla.

Capítulo 5

Análisis multicriterio de las estrategias de rehabilitación de viviendas: casos de estudio

Multi-criteria assessment of the housing retrofitting strategies: case studies

En este capítulo se ilustra la aplicación de la metodología de evaluación multicriterio, descrita previamente en el capítulo 3, mediante su aplicación en los tres casos de estudio expuestos en el capítulo anterior.

A partir de los escenarios propuestos en la presente investigación, se han definido las soluciones de rehabilitación para las ciudades de estudio, partiendo de las actuaciones habituales en cada una de ellas.

En una primera aproximación, el análisis multicriterio se ha abordado de manera independiente para cada una de las ciudades. Con los resultados obtenidos, se ha realizado una comparación de los resultados obtenidos, analizando cada uno de los escenarios descritos, con el fin de poder determinar cómo afectan las distintas políticas de eficiencia energética en diferentes zonas climáticas, si se considera el Enfoque de Ciclo de Vida.

In this chapter, the multi-criteria assessment methodology, previously presented in chapter 3, is illustrated by three case studies, exposed in the preceding chapter.

In each city, energy saving measures have been defined according to the scenarios proposed within this research. Retrofitting solutions are based on the business as usual solutions.

In a first approach, the multi-criteria assessment of each case study has been conducted separately. On the basis of the results obtained, a comparative analysis has been carried out, evaluating each scenario separately. The objective is to determine how convenient the different energy efficiency policies are for housing renovation, in various locations with different climates, if the environmental and economic assessment from the Life Cycle Approach is considered.

Publicaciones y congresos

- **POMBO, O.**, ALLACKER, K., RIVELA, B. y NEILA, J., 2015. Multi-criteria assessment of housing retrofitting solutions through the life cycle approach. A case study in Madrid, Spain. *DS²BE*. Brussels.
- **POMBO, O.**, ALLACKER, K., RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. A multi-criteria approach for the assessment of housing renovation strategies. *Sustainable Built Environment (SBE) regional conference Expanding Boundaries: Systems Thinking for the Built Environment*. Zurich.
- **POMBO, O.**, ALLACKER, K., RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. Sustainability assessment of energy saving measures: a multi-criteria approach for residential buildings retrofitting—A case study of the Spanish housing stock. *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 384-394. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.01.019.
- **POMBO, O.**, GARCÍA-ERVITI, F., RIVELA, B. y NEILA, J., 2014. Energy and economic survey of the renovation of a residential building wall in Madrid - Estudio energético y económico de la rehabilitación de la fachada de un edificio residencial en Madrid. *5th European Conference on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Planning (EESAP)*. San Sebastián, pp. 187-193. ISBN 978-84-9082-003-2.
- **POMBO, O.**, RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. An assessment methodology for the energy, environmental and economic evaluation of housing renovation strategies in Northern Spain. *iiSBE Forum of Young Researchers in Sustainable Building 2016*. Praga.

5.1. Introducción

A lo largo de este trabajo se ha destacado la importancia de la rehabilitación en el momento actual, y la necesidad de evaluar las estrategias de rehabilitación incorporando el Enfoque de Ciclo de Vida ambiental y económico. La aplicación de la propuesta metodológica de evaluación multicriterio se ilustra en el presente capítulo a través de diferentes casos de estudio, que posibilitan abordar la descripción de los aspectos metodológicos más relevantes, así como evaluar si las soluciones que se están aplicando actualmente en la mejora de la eficiencia energética del parque edificado son las más adecuadas.

La selección de los casos de estudio ha sido ampliamente descrita en el capítulo anterior, donde se ha definido un modelo de edificio considerado representativo para el análisis de las soluciones de rehabilitación en Madrid, Bilbao y Sevilla. Asimismo, se han definido los escenarios a evaluar. A partir de estos criterios, en el presente capítulo se han identificado las soluciones para cada escenario, partiendo de las soluciones más habituales en la rehabilitación actual de cada ciudad. Como se ha expuesto previamente, la investigación se centra en estrategias de mejora de la envolvente, ya que como se ha constatado en el estado de la cuestión, que presentan un menor coste de implementación y, a priori, se espera que tenga mayores beneficios ambientales.

Para conocer más en detalle cómo ha sido la rehabilitación del parque residencial hasta el momento actual, se han analizado los expedientes de concesión de las ayudas a la rehabilitación de los diversos programas llevados a cabo en cada una de las localidades objeto de estudio. De este modo, en Madrid se ha contado con la ayuda de la Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo de Madrid (EMVS), en Bilbao han colaborado el Gobierno Vasco, Viviendas Municipales de Bilbao y el Ente Vasco de la Energía (EVE) y, por último, en Sevilla, ha sido la Universidad de Sevilla quien ha proporcionado los datos necesarios para el análisis. Se observa que las estrategias de mejora de la envolvente, han recibido una especial atención en los programas de ayuda a la rehabilitación.

El protocolo de evaluación para cada uno de los casos de estudio abarca el análisis de las condiciones climáticas, la definición de las soluciones de rehabilitación y el análisis multicriterio de las soluciones definidas previamente, identificando las soluciones más recomendables en cada caso.

5.2. Aspectos metodológicos de común aplicación los casos de estudio

5.2.1. Condiciones climáticas

La descripción de los casos de estudio se inicia con el análisis de las respectivas condiciones climáticas, identificando las estrategias pasivas más adecuadas, a través del Climograma de Bienestar Adaptado, el diagrama de Isopletras y la incidencia solar en las superficies verticales según la orientación.

5.2.2. Descripción de las soluciones de rehabilitación a evaluar

5.2.2.1. Escenario E0: Edificio sin rehabilitar

El escenario E0 no es un escenario de rehabilitación en sí mismo, sino que describe el edificio sin rehabilitar (Figura 5.1) y sirve de base para la comparación y la evaluación de los ahorros finales obtenidos debido a la rehabilitación.

Figura 5.1. Esquema del modelo de edificio: alzado, planta y sección constructiva. Fuente: Pombo et al. (2016).

La Tabla 5.1 resume la caracterización de la envolvente del edificio sin rehabilitar. Cabe precisar que, si bien todos los elementos de la envolvente deberían ser mejorados en términos de eficiencia energética, no se interviene en el forjado de planta baja debido a la poca altura libre entre forjados, que es de 2,5 m.

Tabla 5.1. Caracterización de la envolvente del edificio sin rehabilitar. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachada y Patios	Huecos	Suelo
Solución existente	Cubierta inclinada de teja cerámica curva sobre tablero cerámico apoyado sobre tabiques palomeros.	Fachada de doble hoja de medio pie de ladrillo cara vista, con cámara de aire, sin aislamiento térmico.	Carpintería de aluminio sin RPT con vidrio simple de 6 mm.	Forjado sin aislamiento térmico
Transmitancia térmica (W/m ² K)	1,48	1,69	5,7	2,12

5.2.2.2. Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación

Las soluciones de rehabilitación habituales se han definido mediante un análisis sistematizado de los expedientes de concesión de las ayudas a la rehabilitación de la envolvente de las respectivas administraciones públicas en Madrid, Bilbao y Sevilla,.

5.2.2.3. Escenario E2A: CTE DB-HE (rehabilitación)

En la última actualización del Documento Básico HE del Código Técnico de la Edificación se han incluido exigencias para las intervenciones en edificios existentes. En los presentes casos de estudio se rehabilita más del 25% de la superficie total de la envolvente térmica del edificio. Por consiguiente, se limita la demanda energética conjunta del edificio de manera que sea inferior a la del edificio de referencia.

El edificio de referencia se define de acuerdo al Apéndice D del Documento Básico HE 1 (Ministerio de Fomento, 2013), que mantiene la misma forma, tamaño, orientación, zonificación interior, uso de cada espacio, e iguales obstáculos remotos del edificio objeto. Los parámetros de transmitancia y factor solar de los elementos de la envolvente térmica se han definido en base a los establecidos en dicho documento. El documento “Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER” (IDAE, 2009b) recoge el procedimiento detallado para la obtención del edificio de referencia a partir del edificio objeto, incluida la definición constructiva de los elementos, valores de cálculo de los puentes térmicos, niveles de ventilación e infiltración, etc.

La demanda del edificio de referencia se ha calculado mediante la herramienta de simulación EnergyPlus, utilizando el archivo climático correspondiente a cada localidad y el perfil de uso normalizado de los edificios residenciales (solicitaciones interiores) del CTE DB-HE 1 Apéndice C. En cuanto a la ventilación, dado que se está trabajando con un modelo de edificio, se ha asumido que la vivienda tendrá una ventilación higiénica, con una tasa equivalente al mínimo exigido por el DB HS, que en este caso es una tasa de 0,73 ren/h. En cuanto a la tasa de infiltración, se considera 0,24 ren/h (IDAE, 2009b).

Como se ha expuesto en el capítulo anterior, los escenarios de rehabilitación definidos posibilitan no sólo identificar qué soluciones actuales se presentan como las más adecuadas, sino que adicionalmente contribuyen al debate sobre la adecuación de las políticas de rehabilitación, cuestionando si sería pertinente alcanzar escenarios más exigentes respecto a la demanda energética. A este efecto, se ha tratado de mantener como objeto de estudio los sistemas constructivos que se están empleando actualmente (E1), ajustando el espesor de aislamiento o tipo de hueco a la necesidad de cada escenario.

5.2.2.4. Escenario E2B: CTE DB-HE (nueva edificación)

La actualización del CTE DB HE de 2013 ha modificado la manera de definir los requisitos de eficiencia energética en los edificios, adoptando a su vez limitaciones más exigentes. A diferencia de la versión anterior, se limita el consumo de energía primaria y la demanda de climatización, proporcionando unos parámetros orientativos de transmitancia y factor solar de los cerramientos. En la presente investigación se ha considerado únicamente la limitación en la demanda energética del edificio, dado que la limitación de consumo que señala el CTE engloba no sólo la calefacción y refrigeración sino que también el ACS. Además, tal y como se ha señalado previamente, no se incluye una mejora de los equipos, por lo que el consumo de energía primaria queda muy condicionado por el tipo de energía que se utiliza y la eficiencia de los equipos existentes.

Según la normativa, la demanda energética de calefacción del edificio no debe superar el valor límite $D_{cal,lim}$ obtenido mediante la siguiente expresión (Ministerio de Fomento, 2013):

$$D_{cal,lim} = D_{cal,base} + F_{cal,sup} / S$$

Donde $D_{cal,lim}$ es el valor límite de la demanda energética de calefacción, expresada en kWh/m²·año, considerada la superficie útil de los espacios habitables, $D_{cal,base}$ es el valor base de la demanda energética de calefacción, para cada zona climática de invierno correspondiente al edificio, que toma los valores de la tabla 2.1, $F_{cal,sup}$ es el factor corrector por superficie de la

demanda energética de calefacción, que toma los valores de la tabla 2.1 y S es la superficie útil de los *espacios habitables* del edificio, en m^2 .

5.2.2.5. Escenario E3: Estándar Passivhaus

El estándar Passivhaus exhibe unos criterios muy exigentes, especialmente en lo relativo a la estanquidad de edificio. Como ya se ha explicado en el capítulo anterior, se han adoptado las exigencias que indica el estándar para nueva edificación, que limita la demanda de calefacción y refrigeración a 15 kWh/m^2 . Cumplir este escenario implica una correcta ejecución en obra para asegurar que efectivamente se reduce la tasa de infiltraciones a $0,6 \text{ ren/h}$ a 50 Pa .

La ventilación mecánica con recuperación de calor es una invariante del estándar Passivhaus. El recuperador es la pieza clave en el funcionamiento de este tipo de edificios: recoge el calor que transporta el aire interior y lo trasfiere al aire fresco que se recoge del exterior, atemperado, previamente filtrado y en perfectas condiciones higiénicas.

5.2.3. Análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación

La evaluación de las estrategias de rehabilitación se realiza de acuerdo al esquema presentado en el Capítulo 3. En primer lugar, se define el objetivo de la evaluación. Posteriormente, se evalúa el comportamiento energético, ambiental y económico de las soluciones. Y, por último, se aplica la optimización multicriterio para poder evaluar de manera holística los escenarios de rehabilitación.

5.2.3.1. Definición del objetivo y alcance

El objetivo del estudio es realizar un análisis comparativo de diferentes escenarios de actuación en rehabilitación, que sirva como base para contribuir al debate sobre el grado de adecuación de las actuaciones existentes. Para ello, se ha realizado un análisis comparativo del impacto ambiental y el coste económico de los escenarios de rehabilitación definidos anteriormente, considerando el ciclo de vida completo del edificio, “de la cuna a la tumba”.

Equivalente funcional

La unidad funcional, que es la base para el análisis comparativo (ISO 14040, 2006), se ha definido como $1m^2$ de superficie útil de vivienda en un bloque de viviendas situado en Madrid, Bilbao y Sevilla en el año 2014. Se ha considerado una vida en servicio, desde el

momento de la rehabilitación, de 50 años, justificándose este periodo por dos razones: en primer lugar, la revisión crítica ha señalado como 50 años el valor más habitual adoptado en edificación residencial como periodo de tiempo tras la instalación durante el cual el edificio o el sistema ensamblado (parte de la obra) cumple o supera los requisitos técnicos y los requisitos funcionales (Pombo, Rivela, et al., 2016); en segundo, porque la Orden ECO/805/2003 (Ministerio de Economía, 2003) establece una vida útil de 100 años para edificios residenciales. Dado que este edificio es de los años 60, tiene una edad media de 50 años, restando 50 años para completar la vida útil prevista.

Periodo de estudio de referencia (RPS)

El periodo de estudio de referencia -periodo durante el que se analizan las características dependientes del tiempo del objeto de la evaluación- se corresponde con la vida en servicio del edificio, con un valor estimado de 50 años.

Límites del sistema

Dado que el objetivo de la evaluación es identificar los escenarios de rehabilitación más adecuados y que dichos escenarios no difieren en gran medida en la cantidad de materiales existentes a demoler, los materiales del edificio existente se han excluido del análisis, aplicando el principio de exclusión de actividades idénticas en análisis comparativos (UNE-EN 15978, 2012). La evaluación incluye la producción de nuevos materiales para la rehabilitación, el transporte de los mismos a la obra, la propia rehabilitación (limitado a la merma de materiales), la fase de uso (mantenimiento, sustitución, consumo de calefacción y refrigeración) y el fin de vida (limitado a la separación de residuos, el transporte a la planta de gestión de residuos, y el tratamiento de los mismos, que incluye el reciclaje y el vertedero) (Figura 5.2).

Figura 5.2. Límites del sistema adoptados en los casos de estudio. Fuente: elaboración propia.

En la evaluación económica se añade el módulo A0, previo a las etapas de producto y rehabilitación, que recoge los costes previos al comienzo de las obras de rehabilitación, como pueden ser los costes de proyecto o las subvenciones. Con el fin de evitar una distorsión en los resultados, no se ha descontado el importe de las subvenciones en el

coste de inversión, dado que como se ha expuesto en el caso de estudio anterior, el tipo de ayuda y su cuantía varía en función del Plan de Vivienda vigente.

5.2.3.2. Inventario del ciclo de vida

Cuantificación

Los datos sobre el diseño y materiales empleados han sido recopilados en base a las soluciones definidas en cada caso de estudio. La cantidad de materiales involucrados en un metro cuadrado de vivienda se ha calculado en base al ratio de cubierta, fachada (exterior y patios) y huecos (norte, sur, este y oeste) por superficie útil de vivienda (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Ratio de superficie de elemento de la envolvente por 1 m² de superficie útil de vivienda.
Fuente: elaboración propia.

Parte de la envolvente	Ratio	Parte de la envolvente	Ratio
Cubierta	0,114		
Fachada	0,734	Fachada exterior	0,464
		Fachada patios	0,270
Huecos	0,115	Huecos Norte	0,047
		Huecos Sur	0,047
		Huecos Este	0,011
		Huecos Oeste	0,011

En la fase de rehabilitación, se han considerado únicamente las mermas de materiales generadas durante la instalación. Se ha estimado una media de 5% de mermas en base a la literatura existente (Debacker et al., 2013; Allacker et al., 2013; Rivela, 2012). Los datos de consumo energético y uso de agua durante esta fase no se han tenido en cuenta dada su dificultad de cuantificación. No se ha encontrado información al respecto en la literatura ni las propias constructoras han sabido dar respuesta. Cabe mencionar, según Debacker et al. (2013), que el impacto ambiental es despreciable comparado con el resto del ciclo de vida.

En relación a la fase de uso, se ha considerado que aquellos materiales que tienen una vida útil menor a 50 años, es decir, a la vida en servicio del edificio considerada en la presente investigación, serán sustituidos. Por consiguiente, es preciso considerar el número de reposiciones que se dan a lo largo de los 50 años. Por ejemplo, los vidrios tienen una vida útil de 30 años (Saint-Gobain, 2012). Durante la fase de uso, se sustituirán una vez. El Anexo E recoge de manera más exhaustiva los datos de inventario, identificando las vidas útiles de los diversos materiales. Por otro lado, el

mantenimiento generalmente requiere uso de poco material y se ha considerado que tiene un impacto muy poco significativo (Blom et al., 2010), por lo que no se ha contemplado en la evaluación ambiental.

Respecto a la fase de fin de vida, en España la mayoría de los residuos de la construcción (RCD) se vierten en vertederos, ocupando un volumen que excede claramente el volumen ocupado por los residuos domésticos (Ortiz et al., 2010). Sin embargo, en los últimos años se han elaborado directivas y normativas, tanto a nivel Europeo como a nivel local, para tratar de reducir y gestionar los RCD. Por ello, en base a los datos recogidos de la planta de reciclaje Volbas, S.L. se han establecido los materiales que tienen valorización y en qué porcentaje. La normativa actual (RD 105/2008, 2008) obliga a hacer la clasificación de residuos en obra siempre y cuando exista sitio en la parcela. Cuando un edificio se rehabilita, se encuentra dentro de una trama urbana y es difícil poder hacer la clasificación en obra. Por ello, se asume que la clasificación se realiza en la planta de tratamiento.

Tabla 5.3. Escenario de fin de vida considerado. Fuente: elaboración propia a partir de la información proporcionada por: (1) la Planta de Gestión de Residuos Volbas, S. L., (2) las DAP proporcionadas por Saint-Gobain (2012), (3) la Planta de Gestión de RCD Salmedina, Madrid.

	Categoría de producto / categoría de residuo	Vertedero (%)	Reciclaje (%)
17.01	Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos (1)	10	90
17.02.02	Vidrio (2)	95	5
17.02.03	Plásticos (1)	100	0
17.03	Mezclas bituminosas (1)	100	0
17.04	Metales (3)	97,5	2,5
17.06	Materiales aislantes (1)	100	0

Selección de datos

En los últimos años, ha habido un esfuerzo por el desarrollo de bases de datos relativos al sector de la construcción en el contexto español, entre las que destacan las bases de datos del BEDEC y OpenDAP y los sistemas DAPc y Global EPD. Sin embargo, actualmente ninguna dispone de un abanico suficientemente amplio de datos ambientales. Por consiguiente, se ha optado por la base de datos de Econivent 2.2 (Ecoinvent Centre, 2010), seleccionando para cada material el proceso de la base de datos más adecuado (Frischknecht et al., 2005; Frischknecht y Rebitzer, 2005). Con el fin de hacer los datos más representativos, los procesos del mix eléctrico han adaptados al escenario de generación eléctrica europeo, mientras que para los procesos relacionados a la refrigeración (acondicionamiento térmico) se ha aplicado el mix eléctrico español (WWF España, 2013). El Anexo E recoge la relación de materiales con los procesos seleccionados de la base de datos de Ecoinvent.

5.2.3.3. Evaluación del comportamiento energético

Los aspectos energéticos constituyen un componente esencial en la la evaluación del comportamiento ambiental. Dada su relevancia en las actuaciones de rehabilitación, en la presente investigación se ha optado dedicarle una atención prioritaria, presentando los resultados de la evaluación del comportamiento energético previo a abordar la evaluación del comportamiento ambiental global.

Evaluación del comportamiento energético durante la vida útil

En relación al comportamiento energético durante la vida útil, se ha calculado la demanda energética, la reducción de dicha demanda, el consumo y los ahorros de energía final.

Los cálculos se han realizado con la herramienta informática EnergyPlus, seleccionando para cada localidad el archivo climático correspondiente. Dado que el edificio sobre el que se está trabajando no es un edificio real, sino que se trata de un modelo, no ha sido posible establecer un perfil de uso real del edificio. En la estimación del perfil se ha considerado el perfil de uso dado por el CTE DB-HE 1, apéndice C.

En cuanto a la tasa de ventilación, se ha supuesto que la vivienda se ventilará por higiene con una tasa equivalente al mínimo exigido por el CTE DB HS, que en este caso, equivale a 0,73 ren/h. Esta aproximación es la que se emplea en el programa de certificación energética para edificios existentes CE3 (IDAE, 2012).

Tabla 3.1. Perfil de uso normalizado para edificios residenciales. Fuente: CTE DB-HE1, Apéndice C.

USO RESIDENCIAL	(24h, BAJA)				
	1-7	8	9-15	16-23	24
Temperatura Consigna Alta (°C)					
Enero a Mayo	-	-	-	-	-
Junio a Septiembre	27	-	-	25	27
Octubre a Diciembre	-	-	-	-	-
Temperatura Consigna Baja (°C)					
Enero a Mayo	17	20	20	20	17
Junio a Septiembre	-	-	-	-	-
Octubre a Diciembre	17	20	20	20	17
Ocupación sensible (W/m ²)					
Laboral	2,15	0,54	0,54	1,08	2,15
Sábado y Festivo	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Ocupación latente (W/m ²)					
Laboral	1,36	0,34	0,34	0,68	1,36
Sábado y Festivo	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
Iluminación (W/m ²)					
Laboral, Sábado y Festivo	0,44	1,32	1,32	1,32	1,22
Equipos (W/m ²)					
Laboral, Sábado y Festivo	0,44	1,32	1,32	1,32	1,22
Ventilación verano ¹					
Laboral, Sábado y Festivo	4,00	4,00	*	*	*
Ventilación invierno ²					
Laboral, Sábado y Festivo	*	*	*	*	*

¹ En régimen de verano, durante el periodo comprendido entre la 1 y las 8 horas, ambas incluidas, se supondrá que los espacios habitables de los edificios destinados a vivienda presentan una infiltración originada por la apertura de ventanas de 4 renovaciones por hora. El resto del tiempo, indicados con * en la tabla, el número de renovaciones hora será constante e igual al mínimo exigido por el DB.

² El número de renovaciones hora, indicado con * en la tabla, será constante e igual al calculado mínimo exigido por el DB HS.

Evaluación del comportamiento energético del ciclo de vida

La evaluación energética de ciclo de vida sigue los mismos pasos que los establecidos para la evaluación ambiental. Por consiguiente, es preciso calcular la energía embebida de la etapa de rehabilitación, la energía embebida periódica -es decir, la relativa a la sustitución de aquellos materiales con una vida útil menor de 50 años, periodo de estudio de referencia en la presente evaluación-, la energía de uso operacional del edificio y la relativa al fin de vida.

Dado que actualmente no se dispone de un abanico suficientemente amplio de datos de los materiales de construcción en el contexto español, los datos de inventario en la etapa de producto se han seleccionado de la base de datos de Ecoinvent 2.2 (Ecoinvent Centre, 2010). Para cada material se ha elegido el proceso de la base de datos más adecuado (Frischknecht et al., 2005; Frischknecht y Rebitzer, 2005).

Sin embargo, en relación al uso de energía operacional del edificio, en contexto español los factores de conversión de energía final a energía primaria sí están definidos. Por tanto, la energía primaria relativa al consumo operacional del edificio se ha calculado utilizando estos factores, cuyo valor para gas natural es de 1,195, mientras que para electricidad es de 2,461 (IDAE, 2014).

El cálculo de la energía embebida se ha realizado con la herramienta informática SimaPro 7.3.3, y el método de cálculo *Cumulative Energy Demand* (CED) (Frischknecht et al., 2007). Este método de cálculo se basa en el método publicado por Ecoinvent en la versión 1.01, ampliado por PRé para los recursos energéticos disponibles en la base de datos de SimaPro, e incluyendo las sustancias adicionales de la versión de Ecoinvent 2.0. Los factores de caracterización para los recursos energéticos, se dividen en cinco categorías de impacto:

- Energía no renovable, combustibles fósiles
- Energía no renovable, nuclear
- Energía renovable, biomasa
- Energía renovable, eólica, solar, geotérmica
- Energía renovable, hidráulica

Este método no considera la normalización. Sin embargo, con el fin de obtener un valor total, a cada categoría de impacto se le asigna un factor de ponderación de 1 (Frischknecht et al., 2007).

Te falta decir cómo se ha calculado la energía operacional

5.2.3.4. Evaluación del comportamiento ambiental

Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida

Los cálculos se han realizado utilizando la herramienta informática SimaPro 7.3.3, con el método de cálculo CML versión 4.1. (octubre 2012), siguiendo las recomendaciones de la norma europea (UNE-EN 15804+A1, 2014).

Valoración monetaria

Con el fin de alineamiento con los criterios metodológicos que actualmente se están desarrollando en el contexto europeo, los resultados de caracterización ambiental se han monetizado utilizando el método MMG2014 (Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Resumen de los valores monetarios de Europa Occidental (central, inferior y superior) para los indicadores CEN. Fuente: MMG2014 (De Nocker y Debacker, 2015, p. 12).

Indicador ambiental	Unidad	V. Central (€/unidad)	V. Inferior (€/unidad)	V. Superior (€/unidad)
ADP_elementos	kg Sb eq	1,56	0	6,23
ADP_combustibles fósiles	MJ, valor calorífico neto	0	0	0
AP	kg SO ₂ eq	0,43	0,22	0,88
EP	kg (PO ₄) ³⁻ eq	20	6,60	60
GWP	kg CO ₂ eq	0,100	0,050	0,200
ODP	kg CFC 11 eq	49,10	25	100
POCP	kg C ₂ H ₄ eq	0,48	0	6,60

5.2.3.5. Evaluación del comportamiento económico

Cálculo de costes e ingresos

La evaluación económica se ha realizado aplicando el análisis del coste de ciclo de vida, utilizando el método de cálculo y los parámetros económicos definidos en la sección 3.3.4 (Tabla 5.5). Tal y como se ha propuesto, el cálculo económico sigue la siguiente ecuación:

$$VAN(r, N) = -C_R - \sum_{t=0}^N \frac{C_{MRm}(1+i_m)^t + C_{MRI}(1+i_l)^t}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^N \frac{S_g(1+i_g)^t + S_e(1+i_e)^t}{(1+r)^t} - \frac{C_{EOLN}}{(1+r)^N}$$

Donde r es la tasa de descuento real (%), N es la vida útil (años), t es el año (-), i_m , i_l , i_g , i_e son las tasa reales del incremento del precio de los materiales de construcción, mano de obra, gas y electricidad respectivamente (%), C_R es el coste de rehabilitación (€), C_{MRm} es el coste de los materiales para el mantenimiento y sustitución (€), C_{MRI} es el coste de mano de obra para el mantenimiento y sustitución (€), S_g es el ahorro de gas (€), S_e es el ahorro de electricidad (€), y C_{EOL} es el coste de fin de vida (€).

Tabla 5.5. Parámetros de entrada de costes y tasas de crecimiento real para el CCV. Fuente: adaptado de Pombo et al. (2016)

Datos de entrada	Valor y referencia
Precio de gas natural	0,075 €/kWh (EUROSTAT, 2015b)
Precio de electricidad	0,186 €/kWh (EUROSTAT, 2015a)
Tasa de descuento (r)	3% (Comisión Europea, 2012; UNE-EN 16627, 2015)
Incremento del precio de materiales de construcción (i_m)	1,85% (INE, 2015)
Incremento del precio de mano de obra (i_l)	0% (INE, 2015)
Incremento del precio de gas natural (i_g)	3,5% (EUROSTAT, 2009b, 2015b)
Incremento del precio de electricidad (i_e)	5% (EUROSTAT, 2015a, 2009a)
IVA	10%

El coste de rehabilitación (C_R) incluye los costes de material, transporte, mano de obra, costes indirectos, honorarios de los arquitectos y el IVA. El inventario se ha realizado partiendo del trabajo realizado para el ACV. Las etapas de producto y rehabilitación se han integrado en una única etapa, dado que las partidas de las bases de precios que se han utilizado incorporan en el precio de producto las partidas de instalación de dicho producto. Adicionalmente, se han incluido en esta etapa los honorarios de los arquitectos, los costes indirectos y el IVA. Si bien la normativa EN 16627 (2015) recomienda no incluir el IVA en los cálculos, se ha decidido incluirlo porque es el usuario final quien va a asumir el coste de la rehabilitación, y supone una cantidad de dinero relevante como para justificar su consideración.

En la etapa de uso, se han considerado los costes de mantenimiento y los costes de sustitución de aquellos productos cuyo ciclo de vida es inferior al ciclo de vida considerado en el análisis. Dado que estos costes se darán en un futuro, es preciso considerar tanto el incremento del precio de los materiales de construcción como el de mano de obra. Los costes de operación del edificio se han limitado exclusivamente al ahorro energético de calefacción, puesto que el objetivo es estudiar el ahorro energético tras la rehabilitación. Por ello, y como ya se ha explicado a lo largo de la presente investigación, se han considerado los ahorros energéticos debidos a cada uno de los escenarios de rehabilitación propuestos, considerándolos como beneficios.

En la etapa fin de vida, se ha considerado el coste de demolición, así como el coste de transporte de los residuos a la planta de gestión de residuos y al vertedero. Asimismo, sabiendo el consumo del proceso de separación de residuos, se ha calculado el precio por unidad de masa de residuo.

Los precios relacionados con la etapa de producto, en Madrid y Bilbao, han sido seleccionados de la Base de Precios de la Construcción Centro de 2014, base de datos desarrollada por el Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de la Edificación de Guadalajara y que se actualiza todos los años (Precios Centro, 2014). En el País Vasco, la base de precios existente es de 2011 por lo que se ha considerado que los precios no reflejan la variación de los precios de los materiales de construcción en los últimos tres años. En Sevilla, los precios relacionados con la etapa de construcción han sido seleccionados de la Base de Costes de la Construcción de Andalucía (BBCA), base que se actualiza cada dos años.

Las bases de precios seleccionadas no recogen, sin embargo, los costes de mantenimiento y fin de vida. Éstos han sido seleccionados de la base de precios de

CYPE que, para los costes de mantenimiento, proporciona datos mantenimiento decenales.

Desde el año 2009, tras la aprobación de la ley 25/2009, se prohíbe a los Colegios Profesionales y sus organizaciones colegiales establecer baremos orientativos ni cualquier otra orientación, directriz, norma o regla sobre los honorarios profesionales. Por ello, y con el fin de poder establecer una tarifas de honorarios se han tenido en cuenta las tarifas de honorarios de los trabajos aplicables por la Sociedad Estatal de Gestión Inmobiliaria de Patrimonio S.A. (SEGIPSA) aprobadas por el Ministerio de Economía y Hacienda en la Resolución de 22 de abril 2008 donde, a partir del Precio de Ejecución Material (PEM) y la superficie total del edificio, se pueden estimar unos honorarios aproximados. Por último, para los costes energéticos, se ha seleccionado el precio del gas natural y electricidad en el año 2014 en la base estadística de Eurostat (2015b, 2015a).

5.2.3.6. Optimización multicriterio

Como se ha expuesto en el capítulo 3, la optimización multicriterio combina los resultados ambientales y económicos con el fin de elegir el escenario más adecuado. Se han definido tres objetivos para la selección de las estrategias:

- Mínima inversión ambiental (IE), máximos ahorros de ciclo de vida ambientales (LE).
- Mínima inversión económica (IF), máximos ahorros de ciclo de vida económicos (LF).
- Mínima inversión económica (IF), máximos ahorros de ciclo de vida ambientales (LE).

Cada uno de estos objetivos ha sido evaluado con el método de optimización de Pareto, identificando las soluciones más adecuadas. Aquellas soluciones que cumplen los tres objetivos, se han considerado las más recomendables.

Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad se aplican para estimar cómo afectan al resultado final las hipótesis formuladas en el estudio. Las principales hipótesis contempladas en el análisis de sensibilidad son: la vida útil, los valores de monetización, la tasa de descuento y el incremento del precio de la energía.

En el caso del análisis comparativo realizado, se ha estimado una vida en servicio de 50 años. Son varios los autores que afirmaban que la variación de la vida útil puede variar los resultados, ya que una mayor vida útil, implicaría unos mayores ahorros de ciclo de vida. Por ello, y en base a la revisión de las investigaciones existentes (Pombo, Rivela, et al., 2016) se ha establecido el análisis de sensibilidad considerando vidas útiles, desde el momento de la rehabilitación, de 30 y 60 años.

El método de valoración monetaria adoptado en la presente investigación, incorpora los valores inferiores y superiores del ancho de banda de incertidumbre (Tabla 5.4).

La tasa de descuento, tal y como recomienda la Comisión Europea (Comisión Europea, 2012), debe oscilar entre un 2% y un 4%. Dado que en la presente investigación se ha adoptado una tasa de descuento del 3% (UNE-EN 16627, 2015), se adoptan estos valores para el análisis de sensibilidad.

Por último, el incremento del precio de la energía es un parámetro de relevante influencia en los resultados. Cuanto mayor es dicho valor, mayores son los ahorros. Por ello, se ha querido comprobar cómo afecta a los resultados un menor crecimiento del precio de la energía, equiparándose al incremento del IPC (incremento real para gas y electricidad del 0%) y un escenario intermedio (Incremento real del gas y electricidad del 1,75% y 2,5% respectivamente).

5.3. Caso de estudio: Madrid

5.3.1. Condiciones climáticas

Madrid está situada a 667 m de altitud. Pertenece la zona climática D3 del CTE, por lo que es un clima severo tanto en invierno como en verano. La Figura 5.3 presenta los datos climáticos relativos a las temperaturas, precipitaciones, humedad, soleamiento y viento. Las temperaturas medias en invierno oscilan entre los 2,6°C y los 12°C, con una humedad relativa media en torno al 70%. En verano las temperaturas medias rondan los 24°C, con una media mensual de las temperaturas máximas de unos 30°C, mientras que la humedad relativa media desciende al 40%.

El Climograma de Bienestar Adaptado muestra que las máximas temperaturas durante los meses de verano están situadas en el área de bienestar higrotérmico, si bien sería preciso aumentar la humedad relativa del ambiente. Los meses de invierno, sin embargo, se encuentran por debajo de la línea de sombra, por lo que todos ellos precisan de radiación solar durante todo el día.

Por otro lado, el diagrama de isopletras refleja que los meses de invierno es necesario el uso de medios activos, mientras que durante los meses de verano son precisos los elementos de sombreamiento o el enfriamiento pasivo. En mayo y septiembre, la captación solar es suficiente para alcanzar temperaturas de confort.

Por último, el gráfico inferior derecho muestra la incidencia solar en superficies verticales según la orientación. Las orientaciones este y oeste reciben mayor radiación durante los meses de verano, mientras que la orientación sur tiene sus picos en los meses de marzo y septiembre.

Figura 5.3. Análisis climático de Madrid. Fuente: Pérez González (2015).

5.3.2. Descripción de las soluciones de rehabilitación a evaluar

El principal objetivo contemplado en la selección de los casos de estudio es contribuir al debate de si las soluciones de rehabilitación que se están empleando actualmente son adecuadas, cuando se consideran los impactos ambientales y aspectos económicos durante el ciclo de vida de la edificación. Para ello, en primer lugar se ha analizado cómo se ha rehabilitado en Madrid. Gracias a la colaboración de la Empresa Municipal de la Vivienda y Suelo de Madrid (en adelante EMVS) se ha podido acceder a todos los expedientes de concesión de ayudas a la rehabilitación en el periodo 2010-2012. Con esta información, se han identificado las soluciones más comunes. A partir de esta primera identificación, se han definido las soluciones que se han de considerar en el resto de escenarios, ajustándolas a los requisitos establecidos, que vienen delimitados principalmente por la demanda de calefacción y refrigeración (Figura 5.4).

Figura 5.4. Escenarios a evaluar y requisitos que debe cumplir cada escenario en Madrid. Fuente: elaboración propia.

5.3.2.1. Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación

Durante los años 2010-2012, dentro del Plan Estatal de Vivienda y Rehabilitación 2009-2012, el Ayuntamiento de Madrid, a través de la EMVS, concedió subvenciones destinadas a promover el aislamiento del edificio y la eficiencia de las instalaciones. El ámbito de actuación se centraba en edificios que tuvieran una superficie útil mínima destinada al uso residencial del 50% respecto a la superficie útil total, para edificios situados en el municipio de Madrid, a excepción de aquellos incluidos en las Áreas de Rehabilitación vigentes. Las actuaciones subvencionables se clasificaban en dos grupos: (1) medidas de aislamiento térmico e eficiencia energética y (2) medidas distintas de las de aislamiento térmico y eficiencia energética. Dentro del primer grupo, se incentivaban por un lado las medidas pasivas, abarcando las actuaciones en la envolvente térmica, y

por el otro, las medidas activas, siendo las actuaciones para la renovación, adecuación o implantación de instalaciones.

De acuerdo a los objetivos de la presente investigación, se han estudiado las ayudas concedidas únicamente para la mejora del aislamiento térmico y eficiencia energética mediante medidas pasivas. Este grupo incluye aislamiento de cubierta, aislamiento de muros de fachada (principales, patios y medianerías), aislamiento de huecos de fachada (carpinterías, vidrios y otros elementos de cierre) y aislamiento de suelos. El porcentaje de subvención y su correspondiente cuantía máxima se fijaba en relación a la reducción de los valores de la transmitancia térmica de la envolvente del edificio que se consiguiera con la actuación, variando de acuerdo a la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Porcentaje de subvención y cuantía máxima según el grado de reducción de la transmitancia térmica de la envolvente en Madrid. Fuente: EMVS.

Reducción de transmitancia	% Subvención	Cuantía máxima por vivienda
Entre el 5% y el 20%	30%	3.000 €
Entre el 20% y el 30%	40%	4.000 €
Entre el 30% y el 40%	50%	5.000 €
> 40%	60%	6.000 €

Fruto de la colaboración con la EMVS se han podido analizar de manera exhaustiva 56 expedientes de concesión de ayudas, que suponen 1.210 viviendas, recogiendo de manera sistematizada en una tabla la descripción del edificio, la composición del cerramiento actual, la solución adoptada en la rehabilitación, el porcentaje de reducción de transmitancia térmica y la cuantía de subvención recibida. Cerca del 70% de las viviendas analizadas pertenecen al periodo de la postguerra (1940-1980). Dentro de este periodo, las décadas de los 60 y 70 son las más representativas, coincidiendo con las décadas en las que la intervención de la promoción privada fue mayor (Pombo et al., 2014). Esta tabla queda recogida en el Anexo C.

Del estudio realizado, se ha observado que en muchos casos la rehabilitación con mejora energética ha venido motivada por una Inspección Técnica de los Edificios (ITE) desfavorable (46% de los edificios). Ante la obligatoriedad de rehabilitar ciertos elementos del edificio, las ayudas económicas existentes para la mejora de la eficiencia energética han propiciado que se adopten estos criterios en la rehabilitación. La rehabilitación integral de los edificios brilla por su ausencia, siendo un único caso en el que se actúa en toda su envolvente. Sin embargo, en la presente investigación se ha considerado necesario evaluar la rehabilitación integral, por lo que se han identificado las soluciones más habituales de cada elemento por separado.

La cubierta es el elemento que más se ha rehabilitado (84%), seguido de la fachada (62%); los huecos, sin embargo, sólo representan el 23%. Estas ayudas no recogen los resultados de los planes renove de ventanas de la Comunidad de Madrid, que incrementaría el porcentaje de intervención en los huecos. Sin embargo, proporciona una muestra suficiente como para determinar la solución más representativa. La mejora de las instalaciones representa un porcentaje pequeño, y la implementación de paneles solares térmicos tan sólo representa un 1,32% (Figura 5.5). Las mejoras de transmitancia térmica conseguidas oscilan entre el 5 y el 50%.

Figura 5.5. Porcentaje de edificios y viviendas según el elemento rehabilitado. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las soluciones constructivas utilizadas, se observa poca variedad (Tabla 5.7). Las fachadas se rehabilitan en la mayor parte de los casos mediante un sistema de aislamiento por el exterior (SATE), variando el espesor del aislamiento entre 4 y 6 cm. Los huecos se resuelven mediante carpinterías de aluminio con rotura de puente térmico y vidrios dobles aislantes. La cubierta presenta mayor número de alternativas. Algunas se encuentran en mal estado por lo que se sustituyen completamente; en otras, se proyecta el aislamiento por el interior de la vivienda sustituyendo el falso techo. En otros casos, se levanta la cubierta, manteniendo la lámina impermeabilizante y aislando por encima de ésta. Los espesores de aislamiento varían entre 6 y 12 centímetros. Los suelos en contacto con locales no calefactados se aíslan por la cara inferior del forjado mediante placas de poliestireno expandido o proyectando espuma de poliuretano. La Tabla 5.7 recoge las transmitancias térmicas alcanzadas tras la rehabilitación (U_i), comparándolas con la exigencia del CTE, en su versión de 2006, versión vigente cuando se llevaron a cabo las rehabilitaciones. Se puede observar, que debido a las exigencias de las ayudas, las transmitancias térmicas máximas son las establecidas en la norma.

Tabla 5.7. Resumen de las soluciones de rehabilitación adoptadas en los edificios estudiados en Madrid. Fuente: elaboración propia a partir del análisis de los expedientes de concesión de las ayudas de la EMVS en el periodo 2010-2012.

Cubiertas	Fachadas, patios y medianeras	Huecos	Suelos*
Opciones: <ul style="list-style-type: none"> • Reposición de cubierta • Aislamiento cara interior (falso techo) • Aislamiento sobre lámina impermeabilizante 	Opciones: <ul style="list-style-type: none"> • Sistema SATE • Fachada ventilada (sólo 1 caso) 	Opciones: <ul style="list-style-type: none"> • Carpintería de aluminio con vidrios aislantes: <ul style="list-style-type: none"> - Vidrio 4/6/4 - Vidrio 4/12/5 - Vidrio 4/12/6 	Opciones: <ul style="list-style-type: none"> • Aislamiento por la cara inferior
Características: <ul style="list-style-type: none"> • Espesor de aislamiento: 6 - 12 cm • U_i: 0,18 - 0,38 W/m²K • U_{Clim}^{**}: 0,38 W/m²K 	Características: <ul style="list-style-type: none"> • Espesor de aislamiento: 4 - 6 cm • U_i: 0,32 - 0,65 W/m²K • U_{Flim}^{**}: 0,66 W/m²K 	Características: <ul style="list-style-type: none"> • U_i: 2,4 - 3,5 W/m²K 	Características: <ul style="list-style-type: none"> • Espesor de aislamiento: 4 - 6 cm • U_i: 0,25 - 0,49 W/m²K • U_{Slim}^{**}: 0,49 W/m²K

* Suelo de espacio habitable en contacto con el exterior o espacio no habitable; **U límite CTE (2006).

A partir de este primer análisis se han definido las soluciones que se van a evaluar en este escenario. En el caso de la cubierta, se ha encontrado mayor variedad debido a que los edificios que han sido rehabilitados presentan distintos tipos de cubierta y distintas problemáticas. Por ejemplo, la intervención no ha sido igual en una cubierta plana que en una inclinada. Incluso en cubiertas inclinadas, no ha sido la misma en una cubierta de teja cerámica sobre tabiques palomeros que en una cubierta de teja cerámica sobre estructura de madera, donde se ha tenido que levantar toda la cubierta debido al mal estado de la madera. Por ello, se han analizado aquellas cuya composición es similar a la cubierta del edificio a rehabilitar. En este tipo de cubiertas, la solución más común es el aislamiento mediante placas de XPS de 8 cm de espesor sobre el que se ha colocado una placa ondulada de fibras aglutinadas con resinas termoestables, que actúa como impermeabilizante, con un retejado posterior con recuperación de un porcentaje alto de tejas.

En cuanto a la solución de fachadas y patios, el SATE es el sistema habitual, siendo el EPS el aislamiento más común, con unos espesores que oscilan entre 4 y 6 cm. Se ha elegido el aislamiento de 6 cm por tener una transmitancia térmica menor. En cuanto a los huecos, predomina la carpintería de aluminio con rotura de puente térmico y el vidrio doble 4/6/4. No se ha considerado la rehabilitación del suelo en contacto con el terreno porque, como se ha comentado anteriormente, la altura libre entre el forjado y el techo es de 2,5 m, por lo que no se considera viable la incorporación de aislamiento. La Tabla 5.8 recoge las soluciones adoptadas en este escenario (Figura 5.6), así como las transmitancias térmicas calculadas.

Tabla 5.8. Soluciones adoptadas en el Escenario E1 en Madrid. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachadas y patios	Huecos
Soluciones rehabilitación	Aislamiento bajo teja 8 cm XPS	SATE Aislamiento: 6 cm EPS	Aluminio RPT + vidrio 4/6/4
Transmitancia térmica (W/m²K)	1,25*	0,36	2,8

*Este parámetro difiere con el calculado en los expedientes analizados. El cálculo viene recogido en el Anexo D. Su cálculo se ha realizado siguiendo el procedimiento establecido en el documento de apoyo al DB-HE Ahorro de energía (Ministerio De Fomento, 2013, p. 9).

Figura 5.6. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E1 en Madrid. Fuente: elaboración propia.

5.3.2.2. Escenario E2A: CTE DB-HE (rehabilitación)

La demanda del edificio de referencia se calcula en base a los criterios descritos en el apartado 5.2.2.2, adoptando los parámetros característicos de la envolvente del edificio de referencia para la zona climática D3 (Figura 5.7). La demanda de calefacción del edificio de referencia es 36,44 kWh/m², mientras que la de refrigeración es 15,66 kWh/m².

Transmitancia límite de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno	U_{Mlim}: 0,66 W/m² K
Transmitancia límite de suelos	U_{Slim}: 0,49 W/m² K
Transmitancia límite de cubiertas	U_{Clim}: 0,38 W/m² K
Factor solar modificado límite de lucernarios	F_{Llim}: 0,28

% de huecos	Transmitancia límite de huecos U _{Hlim} W/m ² K				Factor solar modificado límite de huecos F _{Hlim}					
	N/NE/NO	E/O	S	SE/SO	Baja carga interna			Alta carga interna		
					E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO
de 0 a 10	3,5	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 11 a 20	3,0	3,5	3,5	3,5	-	-	-	-	-	-
de 21 a 30	2,5	2,9	3,5	3,5	-	-	-	0,54	-	0,57
de 31 a 40	2,2	2,6	3,4	3,4	-	-	-	0,42	0,58	0,45
de 41 a 50	2,1	2,5	3,2	3,2	0,50	-	0,53	0,35	0,49	0,37
de 51 a 60	1,9	2,3	3,0	3,0	0,42	0,61	0,46	0,30	0,43	0,32

Figura 5.7. Parámetros característicos de la envolvente del edificio de referencia para la zona climática D3. Fuente: CTE DB-HE 1 (Ministerio de Fomento, 2013).

Las soluciones de huecos y fachada son las mismas que las del escenario anterior, reduciendo el espesor de esta última en 2 cm. En el caso de la cubierta, sin embargo, al tratarse de una cubierta inclinada sobre tabiques palomeros, se ha modificado la posición del aislamiento para poder cumplir con la transmitancia térmica dada por el CTE. Se recomienda levantar la cubierta, quitar el tablero, que probablemente no se encuentre en perfecto estado, y colocar aislamiento térmico sobre el último forjado, mediante mantas de lana mineral.

La (Tabla 5.9) resume las soluciones de rehabilitación, así como las transmitancias térmicas. Algunas transmitancias térmicas son menores a las dadas para el edificio de referencia, porque los espesores de aislamiento se han elegido partiendo de las soluciones comerciales existentes. A modo de ejemplo, para cumplir los valores del edificio de referencia, el espesor necesario en fachada para este sistema constructivo es de 3,4 cm, mientras que la solución comercial tiene un espesor es de 4 cm.

Figura 5.8. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2A en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.9. Soluciones adoptadas en el Escenario E2A en Madrid. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachadas y patios	Huecos
Soluciones rehabilitación	Aislamiento sobre último forjado. 8 cm MW	SATE Aislamiento: 4 cm EPS	Aluminio RPT + vidrio 4/6/4
Transmitancia térmica (W/m²K)	0,38	0,6	2,8

MW: lana mineral; EPS: poliestireno expandido; RPT: rotura de puente térmico

Tabla 5.10. Soluciones adoptadas en el Escenario E2B en Madrid. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachadas y patios	Huecos
Soluciones rehabilitación	Aislamiento sobre último forjado. 16 cm MW	SATE Aislamiento: 12 cm EPS	N:PVC(*) + vidrio bajo emisivo 8/16/8 S/E/O: PVC(**) + vidrio bajo emisivo 4/10/4
Transmitancia térmica (W/m²K)	0,21	0,26	N: 1,2 S/E/O: 1,6

MW: lana mineral; EPS: poliestireno expandido; *7 cámaras; **5 cámaras.

5.3.2.4. Escenario E3: Estándar Passivhaus

El modelo de edificio que se está analizando es una tipología muy compacta, por lo que se ha observado que para alcanzar la demanda máxima de calefacción, no es necesario llegar a aislamientos tan importantes como los necesarios en viviendas unifamiliares en Centro Europa. Es posible conseguir dicha demanda con las soluciones planteadas en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Soluciones adoptadas en el Escenario E3 en Madrid. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachada	Huecos
Soluciones rehabilitación	Aislamiento sobre último forjado 16 cm MW	SATE Aislamiento: 12 cm EPS	PVC(**) + vidrio 4/10/4
Transmitancia térmica (W/m²K)	0,21	0,26	1,6

MW: lana mineral; EPS: poliestireno expandido; *7 cámaras; **5 cámaras.

En su aplicación a este caso de estudio, se ha optado por la instalación de un sistema de ventilación mecánica con recuperación de calor individual, con impulsión de aire a cada vivienda directamente desde la fachada, y extracción colectiva a cubierta. Para ello, se ha seleccionado un aparato de recuperación de calor de la marca Siber, que debido a su reducido tamaño, es posible situarlo en cada cuarto de baño. Además los tubos son de altura reducida, lo que permite ser instalado en este tipo de viviendas con una altura libre tan reducida. La Figura 5.10 presenta un esquema de la instalación de ventilación mecánica con recuperación de calor en dos viviendas tipo.

Figura 5.10. Instalación individual de ventilación mecánica con recuperador de calor en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.11. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E3 en Madrid. Fuente: elaboración propia.

5.3.3. Análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación

La evaluación de las estrategias de rehabilitación se ha realizado de acuerdo a la metodología desarrollada en el Capítulo 3. En primer lugar, se define el objetivo de la evaluación, con el fin de realizar los cálculos energéticos, ambientales y económicos en base a una misma unidad funcional. Posteriormente, se evalúa el comportamiento energético, ambiental y económico. Y, por último, se aplica la optimización multicriterio para poder evaluar de manera holística los diferentes escenarios de rehabilitación.

5.3.3.1. Definición del objetivo y alcance

El objetivo de la evaluación es evaluar diferentes estrategias de rehabilitación desde la perspectiva ambiental y económica. Para ello, se realiza un análisis comparativo de distintos escenarios de rehabilitación para un modelo de edificio de viviendas representativo situado en Madrid, considerando el ciclo de vida completo del edificio.

Equivalente funcional

La unidad funcional, que es la base para el análisis comparativo (ISO 14040, 2006), se ha definido como 1m² de superficie útil de vivienda en un bloque de viviendas situado en Madrid en el año 2014.

Periodo de estudio de referencia (RPS)

El periodo de estudio de referencia se corresponde con la vida en servicio del edificio, con un valor estimado de 50 años.

Límites del sistema

Tal y como queda descrito en el apartado 5.2.3.1, los límites del sistema abarcan la fase de producto, la fase de rehabilitación, la fase de uso y la fase de fin de vida.

5.3.3.2. Inventario del ciclo de vida

Cuantificación

Las Tablas 5.12, 5.13, 5.14 y 5.15 resumen la cuantificación de los componentes que constituyen la rehabilitación de cada escenario, agrupados según la parte de la envolvente a la que pertenecen. En cuanto a la cubierta, en los cuatro escenarios es necesario levantar la cubierta de teja. Para una vez aislado volver a retejar. En los proyectos analizados para las tres ciudades se ha observado que la recuperación de tejas oscila entre el 70% y el 90%, por lo que se ha considerado un valor intermedio. Los

datos relativos a los pesos de materiales se han obtenido de los catálogos comerciales de los fabricantes y de la consulta realizada a los mismos. En el Anexo E queda recogida la relación de materiales con empresas, así como las distancias consideradas para el transporte de la fábrica a la obra.

Tabla 5.12. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Parte de la envolvente	Componente	Peso	Proporción material
		kg/m ²	%
1. Cubierta	1.1. Teja (Reposición del 20%)	0,73	5,05%
	1.2. Mortero de fijación tejas	1,28	8,88%
	1.3. Placa ondulada	0,34	2,37%
	1.4. Fijaciones placa ondulada	0,002	0,01%
	1.5. Aislamiento XPS 8 cm	0,30	2,09%
	1.6. Fijación mecánica XPS (polipropileno con aditivos)	0,002	0,02%
	1.7. Canalón aluminio	0,02	0,14%
	1.8. Fijaciones canalón	0,002	0,02%
2. Fachada	2.1. Acabado decorativo acrílico	1,93	13,33%
	2.2. Imprimación de fondeo	0,44	3,05%
	2.3. Mortero adhesión y protección aislamiento	4,26	29,46%
	2.4. Malla de fibra de vidrio	0,14	0,99%
	2.5. Anclaje de polipropileno	0,04	0,25%
	2.6. Aislamiento EPS 6 cm	0,97	6,70%
	2.7. Cantoneras (perfiles de aluminio)	0,007	0,05%
	2.8. Bajantes aluminio	0,07	0,48%
	2.9. Ganchos sujeción	0,02	0,11%
3. Huecos	3.1. Carpintería aluminio RPT	1,99	13,74%
	3.2. Persiana aluminio	0,58	3,99%
	3.3. Vidrio doble 4/6/4	1,34	9,26%
TOTAL		14,48	100,00%

RPT: con rotura de puente térmico.

A diferencia del escenario anterior, en los escenarios E2A, E2B y E3, el aislamiento en cubierta se coloca sobre el último forjado desmontando la cubierta actual y colocando un nuevo tablero de rasillón, un panel Onduline que actúa como impermeabilizante y el retejado reutilizando las tejas en buen estado. El aislamiento seleccionado es una lana mineral de ISOVER denominada IBR. Se trata de un rollo de lana de vidrio, no hidrófilo, revestido en una de sus caras con un papel Kraft que actúa como barrera de vapor. En cuanto a la fachada, se elige el sistema de aislamiento térmico por el exterior “coteterm” del grupo Parex, ya que era uno de los sistemas que más se ha encontrado en las memorias de los proyectos analizados. Este mismo sistema se ha utilizado en los cuatro

escenarios planteados, buscando el espesor de aislamiento más adecuado para cada escenario. En cuanto a los huecos, los escenarios E1 y E2A, son iguales. Sin embargo en los escenarios E2B y E3, es necesario recurrir a carpinterías de PVC de altas prestaciones y vidrios dobles bajo emisivos.

Tabla 5.13. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2A por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Parte de la envolvente	Componente	Peso	Proporción material
		kg/m ²	%
1. Cubierta	1.1. Teja (Reposición del 20%)	0,73	3,54%
	1.2. Mortero de fijación tejas	1,28	6,22%
	1.3. Placa ondulada	0,34	1,66%
	1.4. Fijaciones placa ondulada	0,002	0,01%
	1.5. Tablero de rasillón	5,59	27,08%
	1.6. Aislamiento de lana de vidrio 8 cm	0,51	2,48%
	1.7. Reposición de tabiques palomeros	0,72	3,49%
	1.8. Canalón aluminio	0,02	0,10%
	1.9. Fijaciones canalón	0,002	0,01%
2. Fachada	2.1. Acabado decorativo acrílico	1,93	9,33%
	2.2. Imprimación de fondeo	0,44	2,13%
	2.3. Mortero adhesión y protección aislamiento	4,26	20,62%
	2.4. Malla de fibra de vidrio	0,14	0,69%
	2.5. Anclaje de polipropileno	0,04	0,18%
	2.6. Aislamiento EPS 4 cm	0,65	3,13%
	2.7. Cantoneras (perfiles de aluminio)	0,007	0,03%
	2.8. Bajantes aluminio	0,07	0,33%
	2.9. Ganchos sujeción	0,02	0,08%
3. Huecos	3.1. Carpintería aluminio RPT	1,99	9,62%
	3.2. Persiana aluminio	0,58	2,79%
	3.3. Vidrio doble 4/6/4	1,34	6,48%
TOTAL		20,65	100,00%

Tabla 5.14. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Parte de la envolvente	Componente	Peso kg/m²	Proporción material %
1. Cubierta	1.1. Teja (Reposición del 20%)	0,730	3,30%
	1.2. Mortero de fijación tejas	1,284	5,79%
	1.3. Placa ondulada	0,342	1,55%
	1.4. Fijaciones placa ondulada	0,002	0,01%
	1.5. Tablero de rasillón	5,592	25,24%
	1.6. Aislamiento de lana de vidrio 16 cm	1,022	4,61%
	1.7. Reposición de tabiques palomeros	0,720	3,25%
	1.8. Canalón aluminio	0,021	0,09%
	1.9. Fijaciones canalón	0,002	0,01%
2. Fachada	2.1. Acabado decorativo acrílico	1,926	8,69%
	2.2. Imprimación de fondeo	0,440	1,99%
	2.3. Mortero adhesión y protección aislamiento	4,256	19,21%
	2.4. Malla de fibra de vidrio	0,143	0,65%
	2.5. Anclaje de polipropileno	0,037	0,17%
	2.6. Aislamiento EPS 12 cm	1,937	8,74%
	2.7. Cantoneras (perfiles de aluminio)	0,007	0,03%
	2.8. Bajantes aluminio	0,069	0,31%
	2.9. Ganchos sujeción	0,016	0,07%
3A. Huecos N	3.1. Carpintería de PVC con 7 cámaras	0,372	1,68%
	3.2. Persiana PVC	0,326	1,47%
	3.3. Vidrio doble bajo emisivo 8/16/8	1,080	4,87%
3B. Huecos E/O/S	3.4. Carpintería de PVC con 5 cámaras	0,551	2,49%
	3.5. Persiana PVC	0,482	2,18%
	3.6. Vidrio doble bajo emisivo N 4/10/4	0,799	3,61%
	TOTAL	22,156	100,00%

Tabla 5.15. Ratio de los elementos de ventilación mecánica con recuperador de calor por m² de vivienda de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Parte de la envolvente	Componente	Ratio
4. Recuperación calor	4.1. Conductos interiores (PVC) 110X55	0,101
	4.2. Conductos interiores (PVC) 220X55	0,153
	4.3. Conductos exteriores	0,052
	4.4. Sombrerete	0,019
	4.5. Bocas extracción	0,037
	4.6. Bocas impulsión circulares	0,019
	4.7. Rejillas impulsión	0,044
	4.8. Unidades de ventilación mecánica con recuperador de calor	0,019

En el escenario E3, además de los sistemas de rehabilitación pasivos, es obligatorio el uso de la recuperación de calor. Por ello, se instala un sistema de ventilación mecánica con recuperación de calor individual, con una extracción centralizada. El peso de cada

material se ha calculado en base a la instalación dimensionada (Figura 5.10), obteniendo el ratio de cada elemento por metro cuadrado de superficie útil de vivienda.

Tabla 5.16. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E3 por m² de vivienda en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Parte de la envolvente	Componente	Peso	Proporción material
		kg/m ²	%
1. Cubierta	1.1. Teja (Reposición del 20%)	0,73	3,37%
	1.2. Mortero de fijación tejas	1,28	5,92%
	1.3. Placa ondulada	0,34	1,58%
	1.4. Fijaciones placa ondulada	0,002	0,01%
	1.5. Tablero de rasillón	5,59	25,77%
	1.6. Aislamiento de lana de vidrio 16 cm	0,77	3,53%
	1.7. Reposición de tabiques palomeros	0,72	3,32%
	1.8. Canalón aluminio	0,02	0,10%
	1.9. Fijaciones canalón	0,002	0,01%
2. Fachada	2.1. Acabado decorativo acrílico	1,93	8,88%
	2.2. Imprimación de fondeo	0,44	2,03%
	2.3. Mortero adhesión y protección aislamiento	4,26	19,61%
	2.4. Malla de fibra de vidrio	0,14	0,66%
	2.5. Anclaje de polipropileno	0,04	0,17%
	2.6. Aislamiento EPS 12 cm	1,29	5,95%
	2.7. Cantoneras (perfiles de aluminio)	0,007	0,03%
	2.8. Bajantes aluminio	0,07	0,32%
	2.9. Ganchos sujeción	0,02	0,07%
3. Huecos	3.1. Carpintería de PVC con 5 cámaras	0,92	4,25%
	3.2. Persiana PVC	0,81	3,72%
	3.3. Vidrio doble bajo emisivo 4/8/4	1,34	6,17%
4. Recuperación calor	4.1. Conductos interiores (PVC) 110X55	0,09	0,44%
	4.2. Conductos interiores (PVC) 220X55	0,24	1,10%
	4.3. Conductos exteriores	0,09	0,43%
	4.4. Sombrerete	0,04	0,20%
	4.5. Bocas extracción	0,02	0,09%
	4.6. Bocas impulsión circulares	0,01	0,04%
	4.7. Rejillas impulsión	0,02	0,10%
	4.8. Unidades de ventilación mecánica con recuperador de calor	0,47	2,15%
TOTAL		21,70	100,00%

Para el transporte de los materiales de la fábrica a la obra, se han considerado dos tipos de camiones en base a la información dada por los proveedores, un camión de más de 16 toneladas y un camión de entre 20-28 toneladas, para cargas de 18 y 24 toneladas

respectivamente. Las distancias se han considerado entre las fábricas y Madrid (Anexo E).

El cálculo de los consumos energéticos y los ahorros derivados de los distintos escenarios de rehabilitación con respecto al edificio sin rehabilitar se han tomado los evaluados en el apartado 5.3.3.3 (Tabla 5.18 y Tabla 5.19).

Respecto a la fase de fin de vida, las distancias medias consideradas son 10 km de la obra a la planta de gestión de residuos y 15 km de la planta de gestión de residuos al vertedero. Se ha considerado una carga de 16 toneladas (García Martínez, 2010).

Selección de los datos

Tal y como se ha mencionado en la sección 5.2.3.2, debido a la falta de datos de inventario específicos para el contexto español, se ha recurrido a la base de datos de Ecoinvent 2.2 (Ecoinvent Centre, 2010).

5.3.3.3. Evaluación del comportamiento energético

Evaluación del comportamiento energético durante la vida útil

La Figura 5.12 recoge la demanda anual de calefacción y refrigeración para el edificio sin rehabilitar (E0) y los escenarios de rehabilitación planteados (E1-E3). En la figura se han representado tres líneas que indican la demanda límite de calefacción y refrigeración para cada escenario, con el fin de comprobar que todos ellos cumplen los requisitos de partida. En los escenarios E2A, E2B y E3, la demanda de refrigeración es menor a la establecida en cada escenario. En las simulaciones se observó que, debido a la geometría del edificio, se reducía la demanda de refrigeración $1 \text{ kWh/m}^2 \text{ año}$, mientras que aumentaba la demanda de calefacción. Por ello, no se consideraron las protecciones solares en este estudio.

Figura 5.12. Demanda energética anual de los escenarios de rehabilitación en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Los consumos de energía final se han calculado a partir de los rendimientos de los sistemas de calefacción y refrigeración más habituales en Madrid. En relación al sistema de calefacción, la casuística es amplia, pudiendo tratarse de calefacción individual o colectiva, de electricidad, gas, gasóleo, etc. Con el fin de tener unos resultados que reflejen el panorama de Madrid, se ha estudiado el tipo de calefacción predominante mediante los datos del Censo de Población y Viviendas (Instituto Nacional de Estadística, 2015) y la Encuesta de Hogares y Medio ambiente (Instituto Nacional de Estadística, 2008).

La Encuesta de Hogares y Medio Ambiente recoge los resultados por comunidad autónoma en lugar de por municipio. Además, no hace distinción del tipo de sistema por año de construcción del edificio. Sin embargo, da una primera pincelada sobre el sistema de calefacción predominante. La calefacción individual de gas natural representa casi la mitad del parque residencial existente. Con el fin de profundizar en los tipos de sistemas empleados en los edificios residenciales de la década de los 60, y en concreto en un edificio de 10 plantas, se han analizado los datos de la publicación “Escala de calificación energética para edificios existentes” (IDAE, 2011). Esta publicación define además los rendimientos medios estacionales de los sistemas de calefacción y refrigeración para edificios existentes.

Tabla 5.17. Superficie total de calefacción en edificios con sólo varias viviendas familiares, construidas entre 1961 y 1970, según el tipo de combustible, para la localidad de Madrid. Fuente: elaboración propia a partir del documento de Escala de calificación energética para edificios existentes (IDAE, 2011).

Combustible	Tipo de calefacción	Superficie total calefactada	Superficie calefactada en edificios de 10 o más alturas
Gas	Colectiva	901.080	191.171
	Individual	3.783.188	261.613
	Sin instalación, pero con aparatos	447.997	19.170
Electricidad	Colectiva	35.794	5.593
	Individual	774.659	29.380
	Sin instalación, pero con aparatos	1.335.064	54.552

Como se aprecia en la Tabla 5.17, el sistema individual de gas natural es el predominante. Los rendimientos adoptados para este caso de estudio son 75% para calefacción y 138,6% para refrigeración (IDAE, 2011, p. 114). Por último, las Tablas 5.9 y 5.10 muestran los resultados de demanda, consumo de energía final y ahorro de energía final de calefacción y refrigeración.

Tabla 5.18. Resultados de demanda, consumo de energía final y ahorro de calefacción en Madrid. Fuente: elaboración propia.

	E0	E1	E2A	E2B	E3
Demanda anual (kWh/m²)	85,44	36,84	35,46	24,47	14,70
Consumo anual (kWh/m²)	113,92	49,12	47,28	32,63	19,60
Ahorro anual (kWh/m²)	0	64,80	66,64	81,29	94,32

Tabla 5.19. Resultados de demanda, consumo de energía final y ahorro de refrigeración en Madrid. Fuente: elaboración propia.

	E0	E1	E2A	E2B	E3
Demanda anual (kWh/m²)	19,33	14,13	15,55	13,93	9,07
Consumo anual (kWh/m²)	13,95	10,19	11,22	10,05	6,54
Ahorro anual (kWh/m²)	0	3,75	2,73	3,90	7,40

Evaluación del comportamiento energético del ciclo de vida

Los escenarios E1 y E2A presentan unos resultados muy similares, siendo los que menos reducen la energía primaria total en el ciclo de vida (Figura 5.13). La fase de uso es la etapa con mayor relevancia en el consumo de energía primaria. Así, a medida que el escenario es más restrictivo las reducciones son mayores. No obstante, la influencia que tiene la etapa de rehabilitación aumenta, llegando hasta un máximo del 10% aproximadamente (escenario E3). La energía embebida en los materiales de rehabilitación oscila entre 4% y 10%, siendo su contribución significativamente inferior a la energía asociada a la fase de uso.

Figura 5.13. Consumo de energía primaria de ciclo de vida (CED) de los escenarios de rehabilitación en Madrid por superficie de vivienda útil (izda.); influencia de cada etapa del ciclo de vida sobre el CED total en (dcha.). Fuente: elaboración propia.

5.3.3.4. Evaluación del comportamiento ambiental

Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida

Desde el punto de vista ambiental, la fase de uso es la que mayor repercusión tiene en el impacto ambiental del edificio (Figura 5.14). Sin embargo, a medida que se reduce la demanda energética debido a la rehabilitación, el impacto de esta fase disminuye, dando mayor protagonismo a la etapa previa, en este caso la de rehabilitación, llegando a tener una repercusión importante en las categorías de impacto de Potencial de acidificación (AP), Potencial de eutrofización (EP), Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos del ozono troposférico (POCP) y Potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos (ADP-non fossil). La etapa de fin de vida supone un impacto muy pequeño para todas las categorías (1%), excepto para la categoría de EP que oscila entre el 5,5% (E2A) y el 15,7% (E3). Esto es debido al alto impacto que tiene el vertido de materiales

plásticos al vertedero, como el EPS (poliestireno expandido), donde la demanda química de oxígeno (COD) tiene una gran influencia en los resultados (85%).

Figura 5.14. Análisis comparativo de los resultados de caracterización ambiental de los escenarios de rehabilitación en Madrid según la categoría de impacto. Fuente: elaboración propia.

El análisis comparativo de los resultados de caracterización obtenidos en los escenarios de rehabilitación permite identificar el potencial de reducción del impacto ambiental asociado a la rehabilitación del edificio existente (Figura 5.14). Cabe destacar que las mayores reducciones se observan en el escenario E3 para todas las categorías de impacto, seguido del E2B, excepto para la categoría ADP-non fossil. En cuanto a los escenarios E1 y E2A, son muy similares y, en función de la categoría de impacto, es mejor uno u otro.

Con respecto a los impactos en la fase de rehabilitación (agrupando producto y la instalación en obra) tienen distinta influencia según la categoría de impacto evaluada. Así, El escenario E2A tiene un impacto inicial mayor que el escenario E2B en las categorías GWP, ODP, AP y EP. Esto es debido al gran impacto de las carpinterías de aluminio. Sin embargo, el mayor espesor de EPS en fachada del escenario E2B (8 cm más), implica un mayor impacto en las categorías POCP y ADP-Non fossil. El escenario E3 tiene mayor impacto inicial que el escenario E2B en todas las categorías, debido a la instalación mecánica con recuperación de calor, excepto en la categoría de POCP, donde el escenario E3 no tiene tanto impacto ambiental inicial, mientras que el mayor espesor de aislamiento en cubierta y fachada del escenario E2B, hace que el impacto aumente. En este caso, el EPS es quien más influye.

La heterogeneidad de los impactos ambientales y su compleja combinación con los resultados económicos, refuerzan la necesidad llegar a un único valor de puntuación final.

Valoración monetaria

La valoración monetaria permite una evaluación holística del comportamiento ambiental expresada en costes ambientales. La Figura 5.15 muestra el coste ambiental total de los escenarios planteados (imagen izquierda), así como el porcentaje relativo a cada una de las etapas del ciclo de vida en cada uno de los escenarios (imagen derecha).

El escenario E1 presenta el mayor coste ambiental (después del edificio sin rehabilitar) siendo, por tanto, el escenario con menores ahorros ambientales. Como se aprecia en la gráfica, el grado de mejora es muy grande, pudiéndose reducir en más del 50%. Cabe destacar que, a medida que el escenario es más restrictivo, la repercusión de la fase de rehabilitación aumenta. En el caso de Madrid, no es demasiado significativo puesto que esta fase representa como máximo el 15% del ciclo de vida completo del edificio. Sin embargo, duplica el impacto inicial del resto.

Figura 5.15. Coste ambiental de ciclo de vida (LE) de los escenarios de rehabilitación en Madrid por m² de vivienda (izda.) e influencia de cada etapa sobre el coste ambiental de ciclo de vida (LE) completo (dcha.) Fuente: elaboración propia.

Interpretación de los resultados

A la luz de los resultados obtenidos, se puede concluir que en base a la valoración monetaria, el escenario E3 es el que mejor comportamiento ambiental de ciclo de vida presenta en todas las categorías de impacto, seguido del escenario E2B, excepto para la categoría de Potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos (ADP-non fossil), donde se iguala al escenario E1. Los escenarios E1 y E2A son muy similares, siendo en cualquier caso los dos peores escenarios para casi todas las categorías de impacto.

La fase de uso resulta predominante en el ciclo de vida de los escenarios estudiados para todas las categorías de impacto, a excepción del potencial de eutrofización (EP), donde en el caso del escenario E3, la fase de uso supone el 47%. Para las categorías de Potencial de acidificación (AP) y Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos del ozono troposférico (POCP), los impactos de la rehabilitación son significativos para los cuatro escenarios mientras que para el agotamiento de recursos abióticos de elementos (ADP-non fossil), esta fase tiene mayor influencia para el escenario E3 debido al sistema de ventilación mecánica con recuperación de calor.

Los resultados de las siete categorías de impacto no son homogéneos para todas las categorías. Se ha observado que los resultados de la valoración monetaria son coherentes a los resultados de la caracterización ambiental. Estos resultados muestran que el escenario E3 tiene el menor coste ambiental total, mientras que el escenario E1 es el que mayor coste ambiental total presenta.

5.3.3.5. Evaluación del comportamiento económico

La Figura 5.16 muestra el valor actual de los cuatro escenarios analizados durante la vida útil analizada. Como se puede observar, en el año 0 existe un coste relativo a la rehabilitación. De acuerdo a la ecuación del VAN (5.2.3.5), es negativo. Debido a los ahorros energéticos, este valor negativo se va reduciendo a lo largo de la vida útil, hasta llegar al periodo de amortización de la inversión. A partir de dicho año, el valor actual comienza a ser positivo, hasta llegar al año 50, cuyo resultado es el VAN. El coste de inversión de los escenarios E1 y E2A es prácticamente el mismo, siendo los más económicos. El escenario E2B tiene un coste de inversión mayor que los anteriores, pero consigue unos ahorros de ciclo de vida mayores y reduce en 3 años el periodo de amortización, que para este escenario es de 21 años, siendo 24 años para los dos escenarios anteriores (E1 y E2A). El escenario E3, en cambio, es más caro que los escenarios anteriores, tiene el mismo periodo de amortización que los escenarios E1 y E2A (24 años) y presenta unos ahorros un poco mayores que el escenario E2B. Sin embargo, el coste de inversión respecto a este escenario es mayor que los ahorros que se consiguen, por lo que desde el punto de vista económico el escenario E2B parece el más favorable.

Figura 5.16. Valor actual (VA) de los flujos de caja de los escenarios de rehabilitación en Madrid a lo largo del ciclo de vida. Fuente: elaboración propia.

5.3.3.6. Optimización multicriterio

Desde el punto de vista ambiental, los escenarios E1 y E2A no son favorables, ya que tienen un coste ambiental inicial mayor que E2B y unos ahorros de ciclo de vida menores. Si bien estos escenarios cumplen el objetivo 2, mínima inversión económica y máximos ahorros económicos, el coste de inversión del escenario E2B es un poco mayor, consiguiendo unos ahorros mucho mayores, por lo que tampoco son adecuados desde el punto de vista económico. En relación al escenario E3, el coste de inversión es casi un 50% mayor que el escenario E2B, mientras que los ahorros no son tan significativos. En cuanto al tercer objetivo, el Escenario E2B presenta unos ahorros ambientales ligeramente superiores al coste de inversión con respecto a los escenarios E1 y E2A. El escenario E3, por su parte, requiere un coste de inversión mayor a los ahorros ambientales que consigue.

Figura 5.17. Resultados de la optimización multicriterio en Madrid, en base a los objetivos definidos. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro), coste de inversión (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad se han realizado variando la vida útil, desde el momento de la rehabilitación (30 y 60 años), la tasa de descuento (2% y 4%), el crecimiento del precio de la energía (1,75% y 0%), así como los valores monetarios (valores inferiores y superiores).

En el caso de la vida útil restante, la Figura 5.18 muestra la misma tendencia para las tres vidas útiles consideradas. Sin embargo, al variar este parámetro en el análisis económico se observa que si la vida útil considerada, desde el momento de la rehabilitación, es de 30 años, el escenario E3 deja de ser un escenario óptimo, puesto

que tiene un coste de inversión mayor que el escenario E2B, mientras que los ahorros son también menores (Figura 5.18).

Figura 5.18. Análisis de sensibilidad de la vida útil en Madrid. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (izda.); coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (dcha.). Fuente: elaboración propia.

La Figura 5.19, revela que la relación entre los escenarios es muy similar para los distintos valores de monetización.

Figura 5.19. Análisis de sensibilidad de los valores monetarios en Madrid Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) para valores de monetización inferiores, centrales y superiores. Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la variación de la tasa de descuento (Figura 5.20), muestran que, efectivamente, al incrementar la tasa de descuento, los ahorros son menores. Sin embargo, lo que interesa estudiar es si la relación entre los distintos escenarios es la misma y si se modifica la toma de decisiones al variar este parámetro. Se observa que la relación sigue una tendencia similar.

En cuanto al escenario futuro del precio de la energía, si ésta se equipara al IPC (Figura 5.20), ninguno de los escenarios sería rentable. Cabe destacar que este escenario es un escenario extremo, por lo que no se descartan los escenarios. Sin embargo, en un caso intermedio, el escenario E3 deja de ser favorable, ya que requiere una inversión mayor que el escenario E2B, consiguiendo unos menores ahorros de ciclo de vida.

Figura 5.20. Análisis de sensibilidad de la tasa de descuento y el incremento del precio de la energía en Madrid. Coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para distintas tasas de crecimiento del precio de la energía (3,5%, 1,75% y 0%) (izda.); coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para tasas de descuento del 2%, 3% y 4% (dcha.). Fuente: elaboración propia.

5.3.4. Conclusiones del caso de estudio de Madrid

La metodología de evaluación propuesta en el Capítulo 3 se ha ilustrado mediante su aplicación a un caso de estudio para la ciudad de Madrid, lo que ha permitido abordar la evaluación de distintos escenarios de rehabilitación desde la perspectiva energética, ambiental y económica mediante el Enfoque de Ciclo de Vida. En relación a la metodología, se ha podido observar que la valoración monetaria es un valioso aporte a la armonización, que permite el uso de la única métrica, permitiendo la toma de decisiones, aun cuando algunos resultados parecieran contradictorios en distintas categorías de impacto. Además, ha facilitado la comparación de los resultados ambientales y económicos.

A la luz de los resultados energéticos, se puede concluir que, en este caso de estudio, la energía embebida de los materiales tiene una influencia pequeña con respecto al ciclo de vida completo del edificio, que oscila entre un 4% y un 10% de la energía total.

Para el tipo de edificio analizado, situado en Madrid, las estrategias actuales de rehabilitación (escenario E1) no son recomendables desde el punto de vista ambiental. La inversión extra necesaria para la mejora de la envolvente (p. ej. E2B) es pequeña (8%), en comparación con los ahorros ambientales y económicos extra (27% y 37% respectivamente) que se pueden obtener.

Los escenarios E2B y E3 son los únicos que cumplen los tres objetivos propuestos. La instalación de equipos de ventilación mecánica con recuperación de calor encarece el coste de inversión, mantenimiento y sustitución, haciendo que no sea rentable cuando la vida útil del edificio se reduce a 30 años, o el incremento real del precio de la energía se reduce a la mitad. Por tanto, se puede concluir que desde el punto de vista económico tampoco es una solución adecuada.

Como se ha observado, los análisis de sensibilidad han servido para entender la solidez de los resultados obtenidos como consecuencia de la incertidumbre de los parámetros seleccionados y las hipótesis de partida, descartando el escenario E3, y recomendando la adopción del escenario E2B.

5.4. Caso de estudio: Bilbao

5.4.1. Condiciones climáticas

Bilbao se sitúa a muy pocos metros sobre el nivel del mar, tan sólo a 42 m de altitud. Pertenecer a la zona climática C1 del CTE, por lo que es un clima con una severidad climática intermedia en invierno y baja severidad en verano. La Figura 5.21 recoge los datos climáticos relativos a la ciudad de Bilbao. Esta ficha recoge los datos de temperaturas, precipitaciones, humedad y soleamiento. Las temperaturas medias en invierno oscilan entre los 5°C y los 13°C, con una humedad relativa media en torno al 72%. En verano las temperaturas medias oscilan entre los 15°C y los 25°C, manteniéndose una humedad relativa media del 71%. Cabe destacar que el número medio de días despejados mensuales en invierno es de 2,6, mientras que en verano asciende a 3,9.

El Climograma de Bienestar Adaptado muestra que durante los meses de verano se está en las diversas zonas de confort, mientras que en invierno las temperaturas se alejan de la zona de confort. Cabe precisar que estos meses se sitúan por debajo de la línea de sombra, por lo que se requiere radiación solar a lo largo de todas las horas del día.

Además, el diagrama de isopleas muestra que las cargas internas pueden ayudar a reducir la necesidad de calefacción. En verano la ventilación natural es suficiente para evitar el sobrecalentamiento de la vivienda, por lo que no es necesario el uso de sistemas activos.

Por último, el gráfico inferior derecho, muestra la incidencia solar en superficies verticales según la orientación. Se puede observar cómo las orientaciones este y oeste reciben mayor radiación durante los meses de verano, mientras que la orientación sur tiene sus picos en los meses de invierno.

Figura 5.21. Análisis climático Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir de los datos climáticos de Aemet.

5.4.2. Definición de los escenarios de rehabilitación

Al igual que en el caso de estudio de Madrid, el primer paso es definir las limitaciones que presenta cada escenario. La Figura 5.22 resume los escenarios planteados en la presente investigación, recogiendo los requisitos que se deben cumplir en términos de demanda energética en cada caso. Debido a la baja severidad climática en verano, no se considera necesario el uso de refrigeración.

Figura 5.22. Escenarios a evaluar y requisitos que debe cumplir cada escenario en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

5.4.2.1. Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación

En el caso de Bilbao, las ayudas de rehabilitación han sido gestionadas por el Gobierno Vasco. La rehabilitación con criterios de eficiencia energética en viviendas en el País Vasco comenzó a subvencionarse en 2012 con el Programa REVIVE. En esta investigación sólo se han considerado los planes de 2012 y 2013, ya que en 2014 se publicó el plan de ayudas para 2015, pero de este último todavía no hay resultados.

Los planes de vivienda analizados se enmarcan dentro del Plan Estratégico de la CAPV de Rehabilitación de Edificios y Regeneración Urbana 2010-2013 (PERH+), como desarrollo del Plan Director de Vivienda y Regeneración Urbana 2010-2013. En el PERH+ se concretaba la necesidad de evolucionar en las actuaciones, más allá del propio mantenimiento, de los elementos privativos para acometer de manera integral en el conjunto de la edificación y lograr prolongar su vida útil, adecuarla a las actuales exigencias de confort y calidad, cumplir con las condiciones mínimas de habitabilidad y accesibilidad, reducir el consumo energético, contribuyendo a una mejora de la calidad de vida de sus usuarios y de la cohesión social. Así en 2012, se convocaba el Programa

REVIVE, programa de ayudas en materia de Rehabilitación de Viviendas y Edificios (Gobierno Vasco, 2012a).

En 2013, y dentro de la crisis económico-financiera que afectaba a la Comunidad Autónoma del País Vasco, se reformuló el plan de rehabilitación, llamado “Plan Renove en materia de Rehabilitación eficiente de Viviendas y Edificios” (Gobierno Vasco, 2013). El nuevo Plan Renove Euskadi se orientaba a abordar la difícil problemática actual, acotando las ayudas a los fines que se considerasen prioritarios y de imprescindible atención, e incentivando al sector privado para que en términos de sostenibilidad y competitividad, y con soluciones y líneas de ayuda innovadoras, pudieran reactivar el sector de la construcción a través de la rehabilitación, la regeneración y la renovación urbana. Para ello, estas subvenciones estaban destinadas a Comunidades de Propietarios y Promotores Públicos de Viviendas que presentasen propuestas de actuación sobre edificios que tuviesen por uso principal el de vivienda, agrupados hasta configurar bloques o manzanas completas, cuya fecha de construcción fuese anterior a 1980 y dispusiesen de adecuación urbanística y estructural.

Las actuaciones subvencionables en lo relativo a la mejora de la envolvente han sido las siguientes:

- Actuación sobre la envolvente de los edificios –para obtener una la reducción de la demanda térmica del mismo– y actuación sobre las instalaciones de producción térmica –para reducir su consumo energético– con el objeto de alcanzar tras la reforma, al menos, una certificación energética C según el procedimiento definido en el Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, sobre Certificación en Eficiencia Energética en edificios de nueva planta tratando de incorporar en lo posible la producción energética mediante fuentes renovables (Plan REVIVE 2012) y según el procedimiento definido en el Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios, tratando de incorporar en lo posible la producción energética mediante fuentes renovables. (Plan Renove 2013)
- Monitorización de los sistemas para verificar el funcionamiento y efectividad de las medidas adoptadas, con un sistema que permita la tele-lectura, recopilación y explotación de datos de consumos y condiciones ambientales, realizado a distancia por el Departamento de Vivienda, Obras Públicas y Transportes. (Plan REVIVE 2012). Monitorización energética. La comprobación y cuantificación de la mejora en la eficiencia energética del edificio rehabilitado, implicará realizar actuaciones para la medición del confort térmico interior y del consumo energético de calefacción, en una muestra de viviendas representativa del

edificio o bloque rehabilitado. En este sentido, las viviendas que se van a monitorizar se determinarán siguiendo los criterios de la Dirección de Vivienda, en función de la tipología edificatoria, ubicación y orientación, sistemas de calefacción y cualquier otro criterio que incida en la obtención de una muestra suficientemente representativa del edificio. El número mínimo de viviendas que se van a monitorizar contemplado en la solicitud será del 20% en solicitudes de 20 o menos viviendas y del 15% en solicitudes con mayor número de viviendas. (Plan Renove 2013)

Al analizar los proyectos financiados, se ha observado que, a pesar del reducido tamaño de la muestra, las soluciones para la rehabilitación de los huecos son diversas. Por ello, se ha analizado, adicionalmente, el programa de ayudas que anualmente publica el Ente Vasco de la Energía (EVE). Tanto en 2013 como en 2014 y 2015, los requisitos han sido los mismos. Estas subvenciones se han aplicado en la sustitución de ventanas en viviendas de ocupación habitual ubicadas en la CAPV, cumpliendo los siguientes requisitos:

- Las nuevas ventanas deben contar con marcado CE y, en el caso de carpinterías metálicas, debían disponer de rotura de puente térmico.
- En el caso de carpinterías metálicas, deben disponer de rotura de puente térmico.
- El doble acristalamiento está formado por vidrios con aislamiento térmico reforzado (ATR) y deberá tener:
 - un valor de transmitancia térmica ($U_{H,v}$) inferior o igual a $1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$.
 - un espesor de cámara igual o superior a 14 mm.
- Además, todos los huecos deben formar parte de los cerramientos a exterior de la vivienda, no siendo objeto de subvención aquellas ventanas ubicadas en los cerramientos interiores de la vivienda.

Finalmente se han analizado 13 proyectos subvencionados por el Gobierno Vasco en el Gran Bilbao, abarcando un total de 750 viviendas. En este caso, todas las viviendas se construyeron entre 1940 y 1978, de las cuales casi el 40% pertenecen a la década de los 60. Un tercio de los edificios han acometido una rehabilitación integral, actuando sobre la cubierta, la fachada y los huecos. En cuanto a las soluciones adoptadas, y como se puede observar con mayor detalle en el Anexo C, en la mayoría de los casos en los que se rehabilita una cubierta inclinada de teja cerámica, se instalan paneles de poliestireno extruido (XPS) de 5 cm bajo teja sobre los cuales se fija una nueva lámina impermeabilizante.

En el caso de la fachada, se han encontrado dos soluciones: (1) aislamiento por el exterior con un sistema tipo SATE con espesores que oscilan entre 5 y 10 cm y (2) fachada ventilada cerámica con aislamientos que oscilan entre los mismos valores. El material principal que se utiliza en el SATE es el EPS, mientras que las placas rígidas de lana de roca son las más habituales en la fachada ventilada. Para poder ver qué solución es más habitual y definir el espesor de aislamiento que más se utiliza, se han recogido todas las viviendas rehabilitadas en la Tabla 5.20. De esta tabla se deduce que la fachada ventilada cerámica con un espesor de aislamiento de 8 cm es la más habitual.

Por último, en cuanto a los resultados del Plan Renove de ventanas, se han analizado los datos del Plan Renove de 2014. Se subvencionaron 1.398 solicitudes, de las cuales el 80% fueron de PVC. Dentro de esto, y como se observa también en el Anexo C, el vidrio más habitual es un doble vidrio bajo emisivo con cámara de aire de 16 mm con una U de 1,4 W/m²K.

Tabla 5.20. Número de viviendas según tipo de solución de rehabilitación y espesor de aislamiento. Fuente: elaboración propia a partir de los expedientes de concesión de las ayudas en Bizkaia del Gobierno Vasco.

		FACHADA VENTILADA	SATE	Nº VIVIENDAS
ESPESOR AISLAMIENTO	50 mm	136	10	146
	60 mm	42	93	135
	80 mm	358	0	358
	100 mm	0	111	111
Nº VIVIENDAS		536	214	

La cubierta se ha aislado mediante paneles de poliestireno extruido (XPS) de 5 cm de espesor bajo teja y sobre una nueva lámina impermeabilizante, en este caso optando por el sistema de placa ondulada bajo teja. La fachada exterior, a diferencia de Madrid, se rehabilita colocando una fachada ventilada, incorporando un aislamiento de placas rígidas de lana de roca de 8 cm de espesor. En patios, sin embargo, se instala un SATE con un aislamiento de 9 cm de espesor. Por último, se sustituyen todas las carpinterías por carpinterías de PVC de 5 cámaras y vidrios con aislamiento térmico reforzado, 4/16/4 con bajo emisivo, y con una transmitancia térmica del vidrio de 1,4 W/m²K (Figura 5.23).

Figura 5.23. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E1 en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.21. Soluciones adoptadas en el Escenario E1 en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachada	Patios	Huecos
Soluciones rehabilitación	Aislamiento 5 cm con placas XPS bajo teja	Fachada ventilada. Aislamiento: MW 8 cm	SATE. Aislamiento: 9 cm EPS	PVC(5) + vidrio 4/16/4
Transmitancia térmica (W/m²K)	1,25	0,33	0,33	1,4

5.4.2.2. Escenario E2A: CTE DB-HE (rehabilitación)

La demanda del edificio de referencia se calcula en base a los criterios descritos en el apartado 5.2.2.2, adoptando los parámetros característicos de la envolvente del edificio de referencia para la zona climática C1 (Figura 5.24). La demanda de calefacción resultante es 42,19 kWh/m².

Transmitancia límite de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno	U_{Mlim}: 0,73 W/m² K
Transmitancia límite de suelos	U_{Slim}: 0,50 W/m² K
Transmitancia límite de cubiertas	U_{Clim}: 0,41 W/m² K
Factor solar modificado límite de lucernarios	F_{Llim}: 0,37

% de huecos	Transmitancia límite de huecos U _{Hlim} W/m ² K				Factor solar modificado límite de huecos F _{Hlim}					
	N/NE/NO	E/O	S	SE/SO	Baja carga interna			Alta carga interna		
					E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO
de 0 a 10	4,4	4,4	4,4	4,4	-	-	-	-	-	-
de 11 a 20	3,4	3,9	4,4	4,4	-	-	-	-	-	-
de 21 a 30	2,9	3,3	4,3	4,3	-	-	-	-	-	-
de 31 a 40	2,6	3,0	3,9	3,9	-	-	-	0,56	-	0,60
de 41 a 50	2,4	2,8	3,6	3,6	-	-	-	0,47	-	0,52
de 51 a 60	2,2	2,7	3,5	3,5	-	-	-	0,42	-	0,46

Figura 5.24. Parámetros característicos de la envolvente del edificio de referencia para la zona climática C1. Fuente: CTE DB-HE 1 (Ministerio de Fomento, 2013).

Las soluciones (Figura 5.25) se han definido tratando de ajustar los valores de transmitancia térmica, adaptándolos a las soluciones comerciales existentes (Tabla 5.22). En el caso de la cubierta, sin embargo, al tratarse de una cubierta inclinada sobre tabiques palomeros, se ha modificado la posición del aislamiento para poder cumplir con la transmitancia térmica dada por el CTE. Se recomienda levantar la cubierta, quitar el tablero, que probablemente no se encuentre en perfecto estado, y colocar aislamiento térmico sobre el último forjado, mediante mantas de lana mineral.

Figura 5.25. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2A en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.22. Soluciones adoptadas en el Escenario E2A en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachada	Patios	Huecos
Soluciones rehabilitación	Aislamiento sobre último forjado. 8 cm MW	Fachada ventilada Aislamiento: 4 cm MW	SATE. Aislamiento: 3 cm EPS	Aluminio RPT+ vidrio 4/6/4
Transmitancia térmica (W/m²K)	0,38	0,54	0,72	3,3

5.4.2.3. Escenario E2B: CTE DB-HE (nueva edificación)

La demanda límite de calefacción resultante en este escenario es 20,19 kWh/m². En las primeras simulaciones se ha observado que no es posible alcanzar esta demanda con los cerramientos que cumplen las transmitancias térmicas recomendadas por el CTE. Por ello, se han ajustado los espesores de aislamiento y los tipos de vidrio utilizados. La Tabla 5.23 muestra las soluciones y las transmitancias térmicas adoptadas para el caso en el que se establecen los valores U orientativos (1) y para el caso en el que se intenta reducir la demanda de calefacción a los requisitos del CTE (2).

Tabla 5.23. Soluciones de rehabilitación de acuerdo a los valores U orientativos y la solución adoptada para conseguir la demanda límite del escenario E2B en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachada	Patios	Huecos
(1) Valores U orientativos	Aislamiento sobre último forjado: 16 cm MW	Fachada ventilada Aislamiento: 10 cm MW.	SATE. Aislamiento: 12 cm EPS.	N: PVC(7) + vidrio bajo emisivo 8/16/8 S/E/O: PVC(5) + vidrio bajo emisivo 6/12/4
(2) Reducción demanda límite	Aislamiento sobre último forjado: 24 cm MW	Fachada ventilada Aislamiento: 14 cm MW	SATE. Aislamiento: 14 cm EPS	N: PVC(7) + vidrio bajo emisivo 8/16/8 S/E/O: PVC(5)+ vidrio bajo emisivo 4/16/4
Transmitancia térmica (1)	0,21	0,28	0,26	N: 1,2 S/E/O: 1,5
Transmitancia térmica (2)	0,15	0,21	0,23	N: 1,2 S/E/O: 1,4

No obstante, se ha observado en las simulaciones que, a pesar de aumentar el espesor de aislamiento, es muy difícil reducir la demanda a los 20,19 kWh/m². Por ello, se ha estudiado la influencia de las infiltraciones en la demanda. A medida que se rehabilita la envolvente, si se realiza de manera adecuada, se debería mejorar la estanqueidad del edificio, reduciendo las infiltraciones. Sin embargo, como se ha expuesto en el capítulo 3, resulta difícil estimar el parámetro real tras la rehabilitación.

Partiendo del valor dado por el IDAE (2009b), que es 0,24 ren/h a 1 Pa, se han reducido las infiltraciones progresivamente hasta alcanzar el valor exigido por el Estándar Passivhaus para edificios rehabilitados, que es 1 ren/h a 50 Pa, que son aproximadamente 0,06 ren/h (infiltraciones reales) (Figura 5.26). Según la Norma prEN 13790:1999, a la que hace referencia el manual de Calener GT (IDAE, 2009a), los edificios de viviendas plurifamiliares con un nivel de estanqueidad alto son aquellos con una tasa de infiltración menor de 2 ren/h a 50 Pa, mientras que los edificios residenciales con un nivel de estanqueidad medio tienen una tasa de infiltración que oscila entre 2 y 5 ren/h a 50 Pa. Se considera que con las soluciones propuestas en el caso 2 es posible reducir las infiltraciones a 2 ren/h a 50 Pa, que se corresponde con un nivel de estanqueidad medio.

Figura 5.26. Demanda de calefacción para las dos soluciones planteadas en el escenario E2B en Bilbao, según las infiltraciones establecidas. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.27. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2B en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

5.4.2.4. Escenario E3: Estándar Passivhaus

.La reducción de las infiltraciones, así como la incorporación de un sistema de ventilación mecánica con recuperador de calor, permite una reducción importante en la demanda energética, resultando en espesores de aislamiento menos exigentes que el escenario E2B (Figura 5.28 y Tabla 5.24).

Figura 5.28. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E3 en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.24. Soluciones adoptadas en el escenario E3 en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachada	Patios	Huecos	Otros
Soluciones rehabilitación	Aislamiento sobre último forjado 16 cm MW	Fachada ventilada Aislamiento: 10cm MW	SATE Aislamiento: 10 cm EPS	PVC(5) + vidrio bajo emisivo 4/8/4	Ventilación mecánica con recuperación de calor
Transmitancia térmica (W/m²K)	0,27	0,28	0,31	1,8	-

En el Anexo D queda recogido con mayor detalle el cálculo de todas las transmitancias térmicas obtenidas para cada escenario.

Como se ha expuesto en el caso de estudio anterior, la instalación de un sistema de ventilación mecánica con recuperación de calor es obligatoria en el cumplimiento del presente estándar. Al igual que en Madrid, se opta por una instalación individual de ventilación mecánica con recuperación de calor (Figura 5.29).

Figura 5.29. Instalación individual de ventilación mecánica con recuperador de calor en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

5.4.3. Análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación

La evaluación de las estrategias de rehabilitación se realiza de acuerdo a las hipótesis metodológicas planteadas en el apartado 5.2.3.

5.4.3.1. Definición del objetivo y alcance

El objetivo del estudio es comparar distintos escenarios de rehabilitación de un edificio de viviendas representativo de los años 60 situado en Bilbao, con el fin de identificar el más adecuado desde el punto de vista ambiental y económico. Para ello, se ha realizado un análisis comparativo del impacto ambiental y el coste económico de los escenarios de rehabilitación definidos anteriormente, considerando el ciclo de vida completo del edificio, “de la cuna a la tumba”.

Equivalente funcional

La unidad funcional, que es la base para el análisis comparativo (ISO 14040, 2006), se ha definido como 1m² de superficie útil de vivienda en un bloque de viviendas situado en Bilbao en el año 2014.

Periodo de estudio de referencia (RPS)

El periodo de estudio de referencia se corresponde con la vida en servicio del edificio, con un valor estimado de 50 años.

Límites del sistema

El análisis incluye la fabricación de los materiales necesarios para la rehabilitación, el transporte de la fábrica a la obra, la construcción (limitada a la pérdida de materiales debido a la falta de datos sobre el consumo energético del proceso de construcción), la fase de uso (mantenimiento, sustitución, calefacción, y ahorros de calefacción comparado con el edificio sin rehabilitar) y la fase de fin de vida (separación de residuos, transporte a la planta de tratamiento y tratamiento fin de vida, que incluye vertedero y reciclaje).

5.4.3.2. Inventario del ciclo de vida

Cuantificación

El inventario se ha cuantificado en base a los límites del sistema seleccionados y las soluciones propuestas. Los datos sobre los materiales empleados han sido seleccionados a partir de las memorias de los proyectos rehabilitados y las soluciones

constructivas existentes en el mercado. En la Tabla 5.25 se presenta un resumen de la cuantificación de los componentes que constituyen la rehabilitación del escenario E1, clasificados conforme a los distintos elementos de la envolvente. En esta tabla se recogen los datos de materia y transporte. Los datos correspondientes al resto de escenarios se muestran en el Anexo E con el fin de facilitar la lectura del documento.

Los datos se han cuantificado de acuerdo a las cuatro etapas del ciclo de vida: producto, rehabilitación, uso y fin de vida. Para la fase de producto se han cuantificado todos los materiales necesarios para la rehabilitación del edificio. El peso de los materiales se ha obtenido a partir de su volumen, densidad y el ratio de cerramiento por superficie de vivienda.

Para el transporte de los materiales de la fábrica a la obra, se han considerado dos tipos de camiones en base a la información dada por los proveedores, camión mayor de 16 toneladas y camión 20-28 toneladas, para cargas de 18 y 24 toneladas respectivamente. Las distancias se han considerado desde las fábricas al municipio de Bilbao (Anexo E).

El cálculo de los consumos energéticos y los ahorros derivados de los distintos escenarios de rehabilitación con respecto al edificio sin rehabilitar son los analizados en el apartado 5.4.3.3 (Tabla 5.27).

Respecto a la fase de fin de vida, las distancias medias consideradas son 10 km de la obra a la planta de gestión de residuos y 15 km de la planta de gestión de residuos al vertedero. Se ha considerado una carga de 16 toneladas (García Martínez, 2010).

Tabla 5.25. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 por m² de vivienda en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

Componente	PRODUCTO		CONSTRUCCIÓN		USO		FIN DE VIDA		ESCENARIO DE VERTIDO				TRANSPORTE FIN DE VIDA			
	Peso kg	Proporción material %	Peso pérdidas kg	Transp. kgkm	Peso sust. kg	Transp. kgkm	PESO kg	VOLUMEN m³	Tipo de residuo	Porcentaje reciclado %	Peso reciclaje kg	Peso vertedero kg	Transp. planta trat. kgkm	Transp. vertedero kgkm	Transp. total kgkm	
Cubierta	1.1. Teja (Reposición del 20%)	0,730	28,40%	0,037	544,474	0	0	0,730	0,00032	Cerámicos	90%	0,6573	0,0730	6,573	1,826	
	1.2. Mortero de fijación tejas	1,284	49,91%	0,064	48,528	0	0	1,284	0,00114	Cerámicos	90%	1,1554	0,1284	11,554	3,210	
	1.3. Placa ondulada	0,342	13,31%	0,017	7,189	0	0	0,342	0,00034	Otros	0%	0	0,3424	0	8,559	
	1.4. Fijaciones placa ondulada	0,002	0,07%	0,000	0,037	0	0	0,002	0	Otros	0%	0	0,0018	0	0,044	
	1.5. Aislamiento XPS	0,188	7,32%	0,009	108,739	0	0	0,188	0,00571	Plásticos	0,0%	0,0000	0,1883	0	4,707	
	1.6. Fijación mecánica XPS	0,002	0,09%	0,0001	1,335	0	0	0,002	0	Plásticos	0,0%	0	0,0023	0	0,058	
	1.7. Canalón aluminio	0,021	0,81%	0,001	0,436	0	0	0,021	0,00001	Metales	2,5%	0,0005	0,0202	0,005	0,506	
	1.8. Fijaciones canalón	0,002	0,10%	0,0001	0,052	0	0	0,002	0	Metales	2,5%	0,0001	0,0024	0,001	0,060	
Fachada	2.1. Placas cerámicas	14,836	78,12%	0,742	1012,548	0	0	14,836	0,00927	Cerámicos	90%	13,3523	1,4836	133,523	37,090	
	2.2. Aislamiento lana de roca	2,596	13,67%	0,130	588,835	0	0	2,596	0,03709	Otros	0%	0	2,5963	0	64,907	
	2.3. Fijación de polipropileno	0,023	0,12%	0,001	1,582	0	0	0,023	0	Otros	0%	0	0,0232	0	0,580	
	2.4. Perfiles aluminio	1,484	7,81%	0,074	101,255	0	0	1,484	0,00055	Metales	2,5%	0,0371	1,4465	0,371	36,162	
	2.5. Bajantes aluminio	0,043	0,23%	0,002	0,911	0	0	0,043	0,00002	Metales	2,5%	0,0011	0,0423	0,011	1,057	
	2.6. Fijación bajantes	0,010	0,05%	0,001	0,210	0	0	0,010	0	Metales	2,5%	0,0003	0,0098	0,003	0,244	
Patios	3.1. Acabado decorativo acrí.	0,709	23,08%	0,035	335,165	0,745	335,165	1,454	0,00083	Cerámicos	90%	1,3087	0,1454	13	3,635	
	3.2. Imprimitación de fondeo	0,162	5,28%	0,008	76,609	0,170	76,609	0,332	0,00022	Cerámicos	90%	0,2991	0,0332	3	0,831	
	3.3. Mortero adhesión y prot.	1,567	50,99%	0,078	740,555	0	0	1,567	0,00108	Cerámicos	90%	1,4106	0,1567	14,106	3,918	
	3.4. Malla de fibra de vidrio	0,053	1,71%	0,003	24,898	0	0	0,053	0,00018	Otros	0%	0	0,0527	0	1,317	
	3.5. Anclaje de polipropileno	0,014	0,44%	0,001	6,384	0	0	0,014	0	Otros	0%	0	0,0135	0	0,338	
	3.6. Aislamiento EPS	0,535	17,41%	0,027	252,810	0	0	0,535	0,02432	Plásticos	0,0%	0,0000	0,5350	0,000	13,376	
	3.7. Cantonerías	0,002	0,08%	0,0001	1,172	0	0	0,002	0,000001	Metales	2,5%	0,0001	0,0024	0,001	0,060	
	3.8. Bajantes aluminio	0,025	0,82%	0,001	0,531	0	0	0,025	0,00001	Metales	2,5%	0,0006	0,0247	0,006	0,616	
	3.9. Ganchos sujeción	0,006	0,19%	0,0003	0,123	0	0	0,006	0	Metales	2,5%	0,0001	0,0057	0,001	0,142	
Hueco	4.1. Carpintería PVC	1,230	36,43%	0,061	387,395	0	0	1,230	0,00087	Plásticos	0,0%	0,0000	1,2298	0,000	30,746	
	4.2. Persianas PVC	0,808	23,93%	0,040	254,456	0	0	0,808	0,00057	Plásticos	0,0%	0,0000	0,8078	0,000	20,195	
	4.3. Vidrio bajo emisivo 4/16/4	1,339	39,65%	0,067	414,643	1,406	414,643	2,744	0,00110	Vidrio	5,0%	0,1372	2,6070	1,372	65,175	
							30,335	0,084					183,605	299,360	482,965	

Selección de los datos

Tal y como se ha mencionado en el apartado 5.2.3.2, debido a la falta de datos de inventario específicos para el contexto español, se ha recurrido a la base de datos de Ecoinvent 2.2 (Ecoinvent Centre, 2010).

5.4.3.3. Evaluación del comportamiento energético

Evaluación del comportamiento energético durante la vida útil

En lo que a la evaluación energética se refiere, se ha calculado la demanda energética, la reducción de dicha demanda, el consumo y el ahorro de energía final. La Figura 5.30 recoge la demanda anual de calefacción para el edificio sin rehabilitar (E0) y los escenarios de rehabilitación planteados (E1-E3). Las líneas a puntos marcan las limitaciones de demanda. A diferencia del caso de estudio de Madrid, se observa que la demanda en el escenario E1 es menor que el escenario E2A. Esto es debido a que las exigencias para la concesión de la ayudas de rehabilitación han sido más exigentes que lo exigido actualmente por el Código Técnico.

Los consumos de energía final se han calculado en base a los rendimientos de los sistemas de calefacción más habituales en Bilbao. En el País Vasco, más del 50% de las viviendas existentes disponen de sistemas de calefacción de gas natural. Para ser más preciso, la mayoría de viviendas de la década de los 60 disponen de calefacción individual de gas natural (Tabla 5.26). Los rendimientos medios estacionales, al igual que en Madrid, son del 75% para los sistemas de calefacción (IDAE, 2011).

Figura 5.30. Demanda energética de calefacción de los escenarios planteados en Bilbao, señalando la demanda límite en cada caso en líneas discontinuas. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.26. Número total de viviendas en edificios con sólo varias viviendas familiares, construidas entre 1961 y 1970, según tipo de combustible, para la localidad de Bilbao. Fuente: elaboración propia a partir del Censo de Población y Viviendas 2011 (Instituto Nacional de Estadística, 2015).

Combustible	Tipo de calefacción	Número total de viviendas	Número de viviendas en edificios de 10 o más alturas
Gas	Colectiva	5.955	2.265
	Individual	20.255	5.210
	Sin instalación, pero con aparatos	10.485	2.335

Por último, la Tabla 5.27 muestra los resultados de demanda anual, consumo de energía final anual y ahorro energético con respecto al edificio sin rehabilitar (E0).

Tabla 5.27. Resultados energéticos anuales (calefacción) de los escenarios planteados en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

	E0	E1	E2A	E2B	E3
Demanda anual (kWh/m²)	83,19	28,99	40,70	19,03	14,12
Consumo anual (kWh/m²)	110,92	38,65	54,26	25,38	18,83
Ahorro anual (kWh/m²)	0	72,27	56,66	85,54	92,09

Evaluación del comportamiento energético del ciclo de vida

La fase de uso es la etapa con mayor relevancia en el consumo de energía primaria, por lo que la reducción de consumo de energía primaria total, guarda gran relación con los resultados de demanda energética obtenida. Así, a medida que el escenario es más restrictivo, las reducciones son mayores. No obstante, la influencia que tiene la etapa de rehabilitación aumenta, llegando a superar el 20% (escenario E3). La energía embebida en los materiales de rehabilitación oscila entre 9% y 21%, siendo su contribución significativamente inferior a la energía asociada a la fase de uso.

Figura 5.31. Consumo de energía primaria de ciclo de vida (CED) de los escenarios de rehabilitación en Bilbao, por superficie de vivienda útil (izda.); influencia de cada etapa del ciclo de vida sobre el CED total en Bilbao (dcha.). Fuente: elaboración propia.

5.4.3.4. Evaluación del comportamiento ambiental

Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida

La Figura 5.32 recoge el análisis comparativo de los resultados de caracterización ambiental de los escenarios de rehabilitación. El Potencial de calentamiento global (GWP), el Potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférico (ODP), y el Potencial de agotamiento de recursos abióticos de combustibles fósiles (ADP-fossil) presentan unos resultados muy similares, reflejando los resultados energéticos y donde la fase de uso tiene la mayor repercusión. En cuanto a la categoría de potencial de formación de oxidantes fotoquímicos del ozono troposférico (POCP) los resultados van en la misma línea, pero en este caso, la etapa de rehabilitación tiene una influencia importante.

Para el resto de categorías de impacto la etapa de rehabilitación tiene una gran influencia, debido fundamentalmente al gran impacto ambiental de la subestructura de aluminio de la fachada ventilada. Además, el escenario E3, aumenta en mayor proporción en comparación con el resto, debido a la instalación de ventilación mecánica con recuperación de calor. Así, para el potencial de agotamiento de recursos abióticos de elementos la fase de uso de este escenario tiene mucho mayor impacto que el resto de escenarios, debido a la sustitución durante la vida útil de los equipos de ventilación.

La etapa fin de vida tiene un impacto muy reducido para todas las categorías de impacto, excepto para el Potencial de eutrofización (EP), lo que puede justificarse por el alto impacto que tiene el vertido de aislamientos plásticos como el EPS o XPS.

La heterogeneidad de los impactos ambientales hace que, en este caso, los escenarios más favorables no sean los mismos para todas las categorías de impacto, lo que refuerza la necesidad de llegar a una puntuación única, que abarque todas las categorías de impacto definidas y de manera transparente.

Figura 5.32. Análisis comparativo de los resultados de caracterización ambiental de los escenarios de rehabilitación en Bilbao según la categoría de impacto. Fuente: elaboración propia.

Valoración monetaria

Tal y como refleja la Figura 5.33, los resultados presentan gran relación con los resultados energéticos. Sin embargo, a medida que el escenario es cada vez más restrictivo, la etapa de rehabilitación adquiere mayor importancia, superando el 20% en el escenario E3.

Figura 5.33. Análisis del coste ambiental de ciclo de vida (LE) de los escenarios de rehabilitación en Bilbao (izda.); influencia de cada etapa al coste ambiental de ciclo de vida (LE) en Bilbao (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Interpretación de los resultados

A la luz de los resultados obtenidos, se puede concluir que el escenario E3 es el que mejor comportamiento ambiental de ciclo de vida presenta para las categorías de impacto GWP, ODP, EP, POCP y ADP-fossil. Para el resto de categorías, la fase de rehabilitación adquiere gran importancia. Esto hace que para las categorías EP y ADP-non fossil se convierta en la peor alternativa, teniendo mayor impacto que el edificio sin rehabilitar.

La valoración monetaria, permite comparar de manera más sencilla los distintos escenarios de rehabilitación. A medida que el escenario es más estricto, el coste ambiental total disminuye. Sin embargo, tal y como quedaba recogido en el estado de la cuestión, el coste ambiental de la etapa de rehabilitación adquiere mayor relevancia, llegando a superar en el caso de Bilbao el 20%.

5.4.3.5. Evaluación del comportamiento económico

La Figura 5.34 muestra el valor actual de los flujos de caja de los cuatro escenarios analizados durante su vida útil. Como se puede observar, en el año 0 existe un coste relativo a la rehabilitación. Dado que es un gasto, es negativo. Debido a los ahorros energéticos, este valor negativo se va reduciendo a los largo de la vida útil, hasta llegar al periodo de amortización de la inversión. A partir de dicho año, el valor actual comienza a ser positivo, hasta llegar al año 50, cuyo resultado es el VAN.

Figura 5.34. Valor actual (VA) de los flujos de caja de los escenarios de rehabilitación a lo largo de la vida útil en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

El coste de inversión del escenario E3 es mayor que el resto de escenarios, y tiene un VAN menor que los escenarios E1 y E2B. Este escenario (E2B) es el que mayores ahorros de ciclo de vida consigue, mientras que el escenario E2A es el que peor resultado final presenta. El periodo de amortización de estos dos escenarios (E2B y E2A) difiere en 10 años, siendo de 27 y 37 años respectivamente. El escenario E1 tiene una periodo de amortización de unos 30 años, mientras que el del escenario E3 es de 33 años.

5.4.3.6. Optimización multicriterio

La Figura 5.35 recoge los tres objetivos de optimización definidos en la presente investigación. Desde el punto de vista ambiental, el escenario E2A no es adecuado, ya que tiene un mayor coste inicial que el escenario E1, mientras que los ahorros de ciclo de vida son menores.

De acuerdo con los resultados económicos, el escenario E3 tampoco es adecuado, dado que es el más caro, y sus ahorros de ciclo de vida totales son menores a los de los escenarios E1 y E2B. Además, el escenario E2A no es recomendable, dado que con una pequeña (5%) inversión adicional (en comparación con el escenario E1) se pueden conseguir ahorros mucho mayores (88%). Algo similar ocurre al comparar los escenarios E1 y E2B. Sin embargo, la diferencia es menor: la inversión adicional es similar (6%) pero los ahorros extra son menores (32%).

Figura 5.35. Resultados de la optimización multicriterio en Bilbao, en base a los objetivos definidos. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.); coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro); coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.). Fuente: elaboración propia.

En cuanto al último objetivo, donde se busca un menor coste de inversión y unos mayores ahorros ambientales de ciclo de vida, todos los escenarios se sitúan en la curva de Pareto. Sin embargo, los escenarios E2B y E3 presentan unos ahorros similares, mientras que el escenario E3 tiene un coste de inversión mayor que el anterior.

Los escenarios E1 y E2B cumplen los tres objetivos definidos en esta investigación. Cabe destacar que, en función de cuál sea el objetivo de la rehabilitación, el escenario más adecuado puede ser distinto. Si es una administración pública quien está valorando la rehabilitación, elegiría probablemente el escenario E2B, ya que consigue mayores ahorros ambientales y económicos. Si por el contrario se trata de una comunidad de propietarios donde el coste de inversión está limitado, se decantarán por el escenario E1.

Análisis de sensibilidad

Los resultados ambientales (Figura 5.36) presentan la misma tendencia de los resultados al variar los valores de monetización o la vida útil. Por lo que se seguirían eligiendo los mismos escenarios.

Figura 5.36. Análisis de sensibilidad de los valores monetarios y la vida útil en Bilbao. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) para valores de monetización bajos, centrales y superiores (izda.); coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (ahorros LE) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, se han encontrado diferencias en el análisis económico al variar la vida útil y la tasa de crecimiento del precio de la energía (Figura 5.37). Dado que si el precio de la energía sigue subiendo los ahorros económicos aumentan, se decidió analizar situaciones en las que dicho incremento era menor, llegando al extremo de que se igualase al IPC.

Figura 5.37. Análisis de sensibilidad del incremento del precio de la energía y la vida útil en Bilbao. Coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para distintas tasas de crecimiento del precio de la energía (3,5%, 1,75% y 0%) (izda.); coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Si dicho crecimiento se reduce a la mitad (1,75%), los escenarios E2A y E3 dejan de ser rentables. Si se iguala al IPC, ninguno de los escenarios sería rentable. Cabe precisar

que este escenario es extremo, por lo que no se ha utilizado para descartar ningún escenario. Además, si la vida útil se redujera a 30 años, los escenarios E2A y E3 dejarían de ser rentables.

En cuanto a la variación de la tasa de descuento (Figura 5.38), los resultados económicos presentan la misma tendencia para los tres valores analizados.

Figura 5.38. Análisis de sensibilidad de la tasa de descuento en Bilbao. Coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para distintas tasas de descuento (2%, 3% y 4%). Fuente: elaboración propia.

5.4.4. Conclusiones del caso de estudio de Bilbao

En el presente apartado se ha aplicado la metodología desarrollada al caso de estudio de Bilbao, pudiéndose analizar distintos escenarios de rehabilitación desde la perspectiva energética, ambiental y económica de ciclo de vida. Al igual que en el caso de estudio de Madrid, la valoración monetaria ha posibilitado la comparación ambiental y económica, al considerar los impactos ambientales como puntuación única.

Para el tipo de edificio analizado, situado en Bilbao, las estrategias actuales de rehabilitación son favorables. Esto puede deberse a que la exigencia para la concesión de las ayudas es mayor, consiguiendo una importante reducción energética con respecto al escenario E2A, cumplimiento de CTE para rehabilitación.

El escenario E2A no parece adecuado desde el punto de vista ambiental y económico. Esto puede deberse a las bajas exigencias para el cumplimiento del Código Técnico. La inversión adicional para un escenario de aislamiento mayor (E2B) es baja (11%) en comparación con los ahorros ambientales (56%) y económicos (150%) extra.

Los escenarios E1 y E2B son los únicos que cumplen los objetivos de la optimización multicriterio y los análisis de sensibilidad. El primero presenta ahorros menores, pero tiene la ventaja de que su coste de inversión es menor. En función del objetivo de la evaluación, se seleccionará un escenario u otro.

El escenario E3 no parece adecuado desde el punto de vista ambiental. El elevado coste de inversión, en comparación con el resto de escenarios y el sobrecoste de mantenimiento y sustitución de los equipos de ventilación mecánica, hacen que los ahorros económicos sean menores que los de los escenarios E1 y E2B.

A la luz de los resultados obtenidos, se ha observado que si bien los ahorros energéticos condicionan en gran medida la adecuación de las soluciones, no tienen una relación lineal con los resultados ambientales y económicos. Por tanto, se puede concluir que no siempre una mayor exigencia en la demanda energética es una mejora.

Al igual que en el caso de estudio de Madrid, los análisis de sensibilidad han servido para entender la solidez de los resultados obtenidos. Cabe destacar, que son los parámetros económicos los que mayor incertidumbre presentan, y en concreto en este caso, la disminución de la vida útil y la disminución de la tasa de crecimiento del precio de la energía.

5.5. Caso de estudio: Sevilla

5.5.1. Condiciones climáticas

Sevilla, está situada al sur de España, a tan sólo 26 m de altitud. Pertenece a la zona climática B4 del CTE, por lo que se trata de un clima con baja severidad climática en invierno y muy alta severidad climática en verano. Al igual que en el resto de casos de estudio, la Figura 5.39 recoge los datos climáticos más representativos de Sevilla, como son las temperaturas, precipitaciones, humedad, soleamiento, y viento. Las temperaturas medias en invierno oscilan entre 10°C y 15°C, con unas mínimas que varían de 5°C a 9°C y unas máximas de entre 15°C y 20°C. En verano, las temperaturas medias van de los 24°C a los 28°C, con unas mínimas de entre 16,5°C a los 20°C y unas máximas que superan los 30°C (31-35°C). La humedad relativa oscila entre el 30% y el 100%, con una media cercana al 70% en los meses de invierno, descendiendo al 50% en los meses de verano.

El Climograma de Bienestar Adaptado se ha realizado para los meses de verano donde las altas temperaturas exigen una ventilación nocturna, complementada con inercia térmica. La falta de calor puede compensarse con calentamiento solar pasivo. Sin embargo, durante los meses de invierno es necesario el uso de sistemas activos.

De acuerdo al diagrama de isopletras, de junio a septiembre es necesario el uso de estrategias de enfriamiento pasivo y elementos de sombreamiento. Además, la captación solar permite en estaciones intermedias, prescindir de los medios activos.

En relación al gráfico inferior derecho, las orientaciones este y oeste reciben mayor radiación durante los meses de verano, mientras que la orientación sur tiene sus picos en los meses de invierno.

5.5.2. Definición de los escenarios de rehabilitación

Al igual que en los dos casos de estudio anteriores, el primer paso es definir las limitaciones que presenta cada escenario. La Figura 5.40 resume los escenarios definidos en la investigación, recogiendo los requisitos que se deben cumplir en términos de demanda energética en cada caso.

Figura 5.40. Escenarios a evaluar y requisitos que debe cumplir cada escenario en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

5.5.2.1. Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación

En Sevilla, las ayudas a la rehabilitación las ha gestionado la Agencia de Vivienda y Rehabilitación de Andalucía (AVRA). Las subvenciones se han destinado a la reparación de edificios, incluyendo la rehabilitación energética. Para obtener financiación en este ámbito, el requisito era cumplir la transmitancia térmica establecida por el CTE para el elemento rehabilitado. En total, se han analizado 1.285 viviendas, de las cuales 632 son anteriores a 1980. Del estudio realizado, cabe destacar que en ningún caso se ha llevado a cabo una rehabilitación integral. Adicionalmente, cabe destacar la poca variabilidad en las soluciones de rehabilitación.

En relación a la cubierta, si es plana, se sustituye por una nueva cubierta invertida con aislamiento térmico (6 cm de XPS), acabada con solería cerámica. En las cubiertas inclinadas, se demuelen los paños de cubierta de teja con recuperación, limpieza y acopio de piezas de cubrición para posterior reposición. El aislamiento se sitúa sobre el tablero a base de paneles de XPS de 50 mm de espesor, sobre la que se coloca una capa de impermeabilizante compuesta por panel ondulado de fibras aglutinadas con resinas termoestables (tipo Onduline o similar) fijado mecánicamente. La fachada se

rehabilita tan sólo en dos intervenciones, cubriendo 133 viviendas, mediante la insuflación desde el interior de nódulos de lana mineral natural sin ligantes.

En el caso de los huecos, hay dos tipos de intervenciones. La primera, y más numerosa, es la sustitución de la carpintería actual por una carpintería de aluminio con rotura de puente térmica, con cajón de persiana para control solar y vidrios dobles 4/6/4. La segunda, es la colocación de una doble ventana corredera de aluminio con carpintería de aluminio con rotura de puente térmico y doble acristalamiento termoacústico 4/6/4. La Tabla 5.28 resume las estrategias más habituales de rehabilitación.

Figura 5.41. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E1 en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.28. Soluciones adoptadas en el Escenario E1 en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachada	Huecos
Soluciones rehabilitación	Aislamiento bajo teja 5 cm XPS	Relleno de cámara 7 cm LMN sin ligantes	Aluminio RPT + vidrio 4/6/4
Transmitancia térmica (W/m ² K)	1,25	0,4	3,3

LMN: lana mineral natural; RPT: rotura de puente térmico.

5.5.2.2. Escenario E2A: CTE DB-HE (rehabilitación)

Según los parámetros descritos en el apartado 5.2.2.2, así como la definición de la envolvente del edificio de acuerdo a los parámetros de , la demanda de calefacción del edificio de referencia es 13,73 kWh/m², mientras que la de refrigeración es de 28,19 kWh/m².

Transmitancia límite de muros de fachada y cerramientos en contacto con el terreno	U_{Mlim}: 0,82 W/m² K
Transmitancia límite de suelos	U_{Slim}: 0,52 W/m² K
Transmitancia límite de cubiertas	U_{Clim}: 0,45 W/m² K
Factor solar modificado límite de lucernarios	F_{Llim}: 0,28

% de huecos	Transmitancia límite de huecos U _{Hlim} W/m ² K				Factor solar modificado límite de huecos F _{Hlim}					
					Baja carga interna			Alta carga interna		
	N/NE/NO	E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO	E/O	S	SE/SO
de 0 a 10	5,4	5,7	5,7	5,7	-	-	-	-	-	-
de 11 a 20	3,8	4,9	5,7	5,7	-	-	-	-	-	-
de 21 a 30	3,3	4,3	5,7	5,7	-	-	-	0,55	-	0,57
de 31 a 40	3,0	4,0	5,6	5,6	0,55	-	0,58	0,42	0,59	0,44
de 41 a 50	2,8	3,7	5,4	5,4	0,45	-	0,48	0,34	0,49	0,36
de 51 a 60	2,7	3,6	5,2	5,2	0,39	0,55	0,41	0,29	0,42	0,31

Figura 5.42. Parámetros característicos de la envolvente del edificio de referencia para la zona climática B4. Fuente: CTE DB-HE 1 (Ministerio de Fomento, 2013).

Partiendo de las soluciones habituales (escenario E1), se han definido las estrategias que mejor se adecúan a las demandas exigidas en este escenario. La cubierta se ha modificado para poder alcanzar el valor de transmitancia que da el CTE para el edificio de referencia que, al igual que en resto de casos de estudio, se sitúa sobre el último forjado. En cuanto a la fachada, se elige el sistema SATE, ya que el relleno de cámara no permite reducir el espesor de aislamiento de la fachada, por lo que no permite ajustar la transmitancia térmica y, en consecuencia, la demanda. En cuanto a los huecos, a norte se selecciona la misma solución que en el escenario anterior, ya que la exigencia es mayor. A este y oeste, la carpintería es la misma, pero con un vidrio simple es suficiente. A sur, la solución actual cumple los requisitos, por lo que se decide no rehabilitar estos huecos.

Figura 5.43. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2A en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.29. Soluciones adoptadas en el Escenario E2A en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachada	Huecos
Soluciones rehabilitación	Aislamiento sobre último forjado: 8 cm MW	SATE 3 cm MW	N: aluminio RPT + vidrio doble 4/6/4 E/O: aluminio RPT + vidrio simple S: no se rehabilitan
Transmitancia térmica (W/m²K)	0,38	0,71	N: 3,6; S: 5,7; E/O: 4,9

5.5.2.3. Escenario E2B: CTE DB-HE (nueva edificación)

La limitación que más ha condicionado en este escenario es la demanda de refrigeración, que debe ser inferior a 15 kWh/m^2 , mientras que la de calefacción es de 20 kWh/m^2 . Ha sido necesaria la instalación de protecciones solares en todas las orientaciones, tanto en los huecos de las fachadas principales como en los de los patios. Para ello, se ha partido de las máscaras de sombras desarrolladas para Sevilla por Pérez (2015) en su tesis doctoral y se han ajustado las dimensiones de las protecciones solares para el edificio de estudio, con la ayuda del programa informático Ecotect Analysis, de Autodesk. A continuación, se describen las soluciones adoptadas para cada orientación:

Orientación norte

La Figura 5.44 muestra el elemento de protección solar más adecuado para esta orientación. Sin embargo, y dado que la radiación en esta orientación es pequeña, las simulaciones muestran que es posible cubrir la necesidad de sombreamiento con vidrios de aislamiento reforzado con control solar.

Figura 5.44. Definición del elemento de sombreamiento adecuado para un hueco orientado a norte en Sevilla. Fuente: Pérez González (2015).

Orientación sur

Figura 5.45. Definición del elemento de sombreamiento adecuado para un hueco orientado a sur en Sevilla. Fuente: Pérez González (2015).

Figura 5.46. Definición del tipo de hueco en la fachada sur en función de las sombras arrojadas en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

La Figura 5.45 presenta la definición del elemento de sombreado adecuado para esta orientación. Sin embargo, al realizar el estudio de sombras en Ecotect, se observa que los balcones existentes arrojan sombras en los huecos que permitirían optimizar estas protecciones y reducir sus dimensiones (Figura 5.46). De este modo, se abarataría el coste y se reduciría la cantidad de material a utilizar. Se han definido dos tipos de soluciones para los huecos situados en la fachada exterior (huecos tipo 1 y 2) y un tercero para los huecos del patio (hueco tipo 3) (Figura 5.47). La Figura 5.46 muestra los dos tipos de huecos identificados en la fachada exterior en función de las sombras arrojadas de los balcones.

Figura 5.47. Dimensiones de las protecciones solares según los tipos de hueco, para el edificio de estudio en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Orientación este

Figura 5.48. Definición del elemento de sombreado adecuado para un hueco orientado a este en Sevilla. Fuente: Pérez González (2015).

La Figura 5.48 muestra el tipo de protección solar más adecuado para el hueco situado a este. Una vez más, se ha ajustado esta dimensión con la herramienta informática Ecotect (Figura 5.49).

Figura 5.49. Dimensiones de las protecciones solares en orientación este, para el edificio de estudio en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Orientación oeste

Como se observa en la Figura 5.50, la orientación oeste requiere protección total. Por tanto, se seleccionan celosías correderas de lamas orientables, que permiten ser retiradas en invierno, evitando la reducción de ganancias solares en este periodo.

Figura 5.50. Máscara de sombra relativa a la orientación oeste en Sevilla (izda.) y elemento seleccionado para el edificio de estudio (dcha.). Fuentes: Pérez González (2015) y www.tamiluz.es.

De este modo, las soluciones relativas al presente escenario de rehabilitación quedan resumidas en la Tabla 5.30.

Tabla 5.30. Soluciones adoptadas en el Escenario E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachada	Huecos
Soluciones rehabilitación	Aislamiento sobre último forjado: 10 cm MW	SATE 8 cm MW	N:PVC(5)+vidrio doble bajo emisivo control solar 4/6/4 E/O: PVC (3) + vidrio doble bajo emisivo 4/6/4 Protecciones solares
Transmitancia térmica (W/m²K)	0,21	0,26	N: 3,6; S: 5,7; E/O: 4,9

Figura 5.51. Sección constructiva de las soluciones de rehabilitación aplicadas en el escenario E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Figura 5.53. Instalación individual de ventilación mecánica con recuperador de calor en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.31. Soluciones adoptadas en el Escenario E3 en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

	Cubierta	Fachada	Huecos	Otros
Soluciones rehabilitación	Aislamiento sobre último forjado 10 cm MW	SATE 8 cm MW	N:PVC(5)+vidrio doble bajo emisivo con control solar 4/6/4 E/O/S: PVC (3) + vidrio doble bajo emisivo 4/6/4 Protecciones solares	Ventilación mecánica con recuperación de calor
Transmitancia térmica (W/m²K)	0,21	0,26	N: 3,6; S: 5,7; E/O: 4,9	-

En el Anexo D queda recogido con mayor detalle el cálculo de todas las transmitancias térmicas obtenidas para cada escenario.

5.5.3. Análisis multicriterio de las soluciones de rehabilitación

Al igual que en los casos de estudio previos, se define, en primer lugar, el objetivo de la evaluación. A continuación, se evalúa el comportamiento energético, ambiental y económico. Y, por último, se aplica la optimización multicriterio para poder evaluar de manera holística los escenarios de rehabilitación.

5.5.3.1. Definición del objetivo y alcance

El objetivo del estudio es comparar distintos escenarios de rehabilitación de un edificio de viviendas representativo de los años 60 situado en Sevilla, con el fin de identificar las actuaciones más adecuadas desde el punto de vista ambiental y económico. Para ello, se ha realizado un análisis comparativo del impacto ambiental y el coste económico de los escenarios de rehabilitación definidos anteriormente, considerando el ciclo de vida completo del edificio, “de la cuna a la tumba”.

Equivalente funcional

La unidad funcional, que es la base para el análisis comparativo (ISO 14040, 2006), se ha definido como 1m² de superficie útil de vivienda en un bloque de viviendas situado en Sevilla en el año 2014.

Periodo de estudio de referencia (RPS)

El periodo de estudio de referencia se corresponde con la vida en servicio del edificio, con un valor estimado de 50 años.

Límites del sistema

El análisis incluye la fabricación de los materiales necesarios para la rehabilitación, el transporte de la fábrica a la obra, la construcción (limitada a la pérdida de materiales debido a la falta de datos sobre el consumo energético del proceso de construcción), la fase de uso (mantenimiento, sustitución, consumo de energía final de calefacción y refrigeración, y ahorro energético comparado con el edificio sin rehabilitar) y la fase de fin de vida (separación de residuos, transporte a la planta de tratamiento y tratamiento fin de vida, que incluye vertedero y reciclaje).

5.5.3.2. Inventario del ciclo de vida

Cuantificación

El inventario se ha cuantificado en base a los límites del sistema seleccionados y las soluciones propuestas. Los datos sobre los materiales empleados han sido seleccionados a partir de las memorias de los proyectos rehabilitados y las soluciones constructivas existentes en el mercado. En la Tabla 5.32 se presenta un resumen de la cuantificación de los componentes que constituyen la rehabilitación del escenario 1, clasificados conforme a los distintos elementos de la envolvente. En esta tabla se recogen los datos de materia y transporte. Los datos correspondientes al resto de escenarios se muestran en el Anexo E, con el fin de facilitar la lectura del documento.

Los datos se han cuantificado de acuerdo a las cuatro etapas del ciclo de vida: producto, rehabilitación, uso y fin de vida. Para la fase de producto se han cuantificado todos los materiales necesarios para la rehabilitación del edificio. El peso de los materiales se ha obtenido a partir de su volumen, densidad y el ratio de cerramiento por superficie de vivienda.

Para el transporte de los materiales de la fábrica a la obra, se han considerado dos tipos de camiones en base a la información dada por los proveedores, camión mayor de 16 toneladas y camión de 20-28 toneladas, para cargas de 18 y 24 toneladas respectivamente. Las distancias se han considerado desde las fábricas al municipio de Sevilla.

El cálculo de los consumos energéticos y los ahorros derivados de los distintos escenarios de rehabilitación con respecto al edificio sin rehabilitar son los analizados en el apartado 5.5.3.3.

Las distancias medias consideradas son 17 km de la obra a la planta de gestión de residuos y al vertedero que, en Sevilla, se encuentran situados en la misma planta. Se ha considerado una carga de 16 toneladas (García Martínez, 2010).

Tabla 5.32. Datos de inventario de las soluciones de rehabilitación del escenario E1 por m² de vivienda en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Componente	PRODUCTO		CONSTRUCCIÓN		USO		FIN DE VIDA		ESCENARIO DE VERTIDO				TRANSPORTE FIND DE VIDA			
	Peso kg	Proporción material %	Peso pérdidas kg	Transp. kgkm	Peso sust. kg	Transp. kgkm	PESO kg	VOLUMEN m³	Tipo de residuo	Porcentaje reciclado %	Peso reciclaje kg	Peso vertedero kg	Transp. planta trat. kgkm	Transp. vertedero kgkm	Transp. total kgkm	
Cubierta	1.1. Teja (Reposición del 20%)	0,730	27,19%	0,037	383,432	0	0	0,730	0,00032	Cerámicos	90%	0,6573	0,0730	11,174	1,242	
	1.2. Mortero de fijación tejas	1,284	47,80%	0,064	94,360	0	0	1,284	0,00114	Cerámicos	90%	1,1554	0,1284	19,642	2,182	
	1.3. Placa ondulada	0,342	12,75%	0,017	314,534	0	0	0,342	0,00034	Otros	0%	0	0,3424	0	5,820	
	1.4. Fijaciones placa ondulada	0,002	0,07%	0,0001	1,626	0	0	0,002	0,00000	Otros	0%	0	0,0018	0	0,030	
	1.5. Aislamiento de XPS	0,188	7,01%	0,009	184,856	0	0	0,188	0,00571	Plásticos	0,0%	0,0000	0,1883	0	3,201	
	1.6. Fijación mecánica XPS	0,002	0,09%	0,0001	2,269	0	0	0,002	0,00000	Plásticos	0,0%	0	0,0023	0	0,039	
	1.7. Canalón acero galvanizado	0,137	5,09%	0,007	20,111	0	0	0,137	0,00002	Metales	2,5%	0,0034	0,1334	0,058	2,268	
	1.8. Fijaciones canalón	0,0003	0,01%	0,00001	0,038	0	0	0,0003	0,00000	Metales	2,5%	0,0000	0,0003	0,0001	0,004	
Fachada	2.1. Aislamiento nódulos de lana mineral	1,798	100,00%	0,090	2170,994	0	0	1,798	0,05137	Otros	0%	0,0000	1,7979	0,0000	30,565	
Huecos	3.1. Carpintería aluminio RPT	1,986	50,90%	0,099	510,859	0	0	1,986	0,00074	Metales	2,5%	0,0496	1,9362	0,844	32,915	
	3.2. Persiana aluminio	0,577	14,79%	0,029	148,433	0	0	0,577	0,00021	Metales	2,5%	0,0144	0,5626	0,245	9,564	
	3.3. Vidrio 4/6/4	1,339	34,31%	0,067	1194,734	1,406	1195	2,744	0,00110	Vidrio	5,0%	0,1372	2,6070	2,333	44,319	
							9,791		0,061		34,297		132,149		166,446	

Selección de los datos

Los datos de inventario se han seleccionado, una vez más, de la base de datos Ecoinvent 2.2 (Ecoinvent Centre, 2010). Para la modelización de los consumos energéticos, se ha considerado el perfil eléctrico de generación español (WWF España, 2013).

5.5.3.3. Evaluación del comportamiento energético

Evaluación del comportamiento energético durante la vida útil

Figura 5.54. Demanda energética de calefacción (izda.) y refrigeración (dcha.) de los escenarios de rehabilitación. Fuente: elaboración propia.

La Figura 5.54 presenta la demanda anual de calefacción y refrigeración de los escenarios de rehabilitación. Las líneas discontinuas reflejan las limitaciones de demanda de cada escenario. En los escenarios E2B y E3 la demanda de refrigeración ha condicionado sobremanera las soluciones de rehabilitación, por lo que las demandas de calefacción son mucho menores de lo exigido. Como era previsible, los escenarios E1 y E2A tienen unas demandas muy similares. En lo relativo a la calefacción, el escenario E2A es un poco menor ($0,3 \text{ kWh/m}^2$). Esto puede deberse a que el aislamiento, aun siendo de menor espesor, se sitúa al exterior, por lo que se reducen los puentes térmicos. Además, se incrementa el espesor en cubierta y se coloca sobre el último forjado. Sin embargo, esta solución en cubierta hace que la refrigeración sea un poco mayor ($0,5 \text{ kWh/m}^2$).

Para el cálculo de los consumos de energía final, se han identificado los equipos predominantes en Sevilla, para calefacción y refrigeración. En base a la Encuesta de

Hogares y Medioambiente (Instituto Nacional de Estadística, 2008), los radiadores y acumuladores eléctricos son el principal sistema de calefacción en Andalucía, con un rendimiento del 95% (IDAE, 2011). La eficiencia de los equipos de rehabilitación es de 129,6% (IDAE, 2011). A modo de resumen, las Tabla 5.33 y Tabla 5.34 muestran los resultados de demanda anual, consumo de energía final anual y ahorro energético anuales con respecto al edificio sin rehabilitar (E0).

Tabla 5.33. Resultados energéticos anuales (calefacción) de los escenarios planteados en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

	E0	E1	E2A	E2B	E3
Demanda anual (kWh/m²)	31,07	13,30	13,02	8,27	5,33
Consumo anual (kWh/m²)	32,71	14,00	13,70	8,71	5,61
Ahorro anual (kWh/m²)	0	18,70	19,00	24,00	27,09

Tabla 5.34. Resultados energéticos anuales (refrigeración) de los escenarios planteados en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

	E0	E1	E2A	E2B	E3
Demanda anual (kWh/m²)	35,91	27,27	27,74	19,85	13,61
Consumo anual (kWh/m²)	27,71	21,05	21,40	15,32	10,51
Ahorro anual (kWh/m²)	0	6,66	6,31	12,39	17,20

Evaluación del comportamiento energético del ciclo de vida

Los escenarios E1 y E2A presentan unos resultados muy similares, siendo los que menos reducen la energía primaria total (Figura 5.55). La fase de uso es la etapa con mayor relevancia en el consumo de energía primaria. Así, a medida que el escenario es más restrictivo las reducciones son mayores. No obstante, la influencia que tiene la etapa de rehabilitación aumenta, llegando hasta un máximo del 10% aproximadamente (escenario E3). En el caso de Sevilla, el consumo de energía operacional del edificio se produce mediante electricidad. El factor de conversión de energía final a energía a energía primaria para electricidad es el doble que para gas natural (2,461 y 1,195 respectivamente). Por tanto en Sevilla, el consumo de energía operacional del edificio durante la fase de uso tiene mayor repercusión que en Madrid y Bilbao. La energía

embebida en los materiales de rehabilitación oscila entre 3% y 12%, siendo su contribución significativamente inferior a la energía asociada a la fase de uso.

Figura 5.55. Consumo de energía primaria de ciclo de vida (CED) de los escenarios de rehabilitación en Sevilla por superficie de vivienda útil (izda.); influencia de cada etapa del ciclo de vida sobre el CED total (dcha.). Fuente: elaboración propia.

5.5.3.4. Evaluación del comportamiento ambiental

Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida

La Figura 5.56 recoge el análisis comparativo de los resultados de caracterización ambiental de los escenarios de rehabilitación. Los resultados muestran que a medida que el escenario es más restrictivo, el impacto ambiental total es menor, excepto para la categoría de Potencial de agotamiento de los recursos abióticos de elementos (ADP-non fossil), donde los escenarios E1 y E2A tienen el mismo impacto. Sin embargo, la influencia que tiene la fase de rehabilitación de cada escenario difiere según la categoría de impacto. Los mayores aumentos en esta fase los registra el escenario E3 en todas las categorías de impacto excepto en la categoría de Potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférica (ODP), donde el escenario E1 tiene un aporte mayor debido al alto impacto de las carpinterías de aluminio.

Figura 5.56. Análisis comparativo de los resultados de caracterización ambiental de los escenarios de rehabilitación en Sevilla, según la categoría de impacto. Fuente: elaboración propia.

Valoración monetaria

En la Figura 5.57 se observa que tal y como mostraba la caracterización ambiental, a medida que el escenario es más restrictivo, el coste ambiental total se reduce, aumentando la influencia que tiene la fase de rehabilitación sobre el coste total. En el escenario E3, esta etapa representa el 34%. Cabe destacar que este impacto se da en el año 0, mientras que el 66% restante sucede a lo largo de los 50 años de vida útil.

Figura 5.57. Análisis del coste ambiental de ciclo de vida (LE) de los escenarios de rehabilitación en Sevilla (izda.); influencia de cada etapa al coste ambiental de ciclo de vida (LE) (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Interpretación de los resultados

A la luz de los resultados obtenidos, se puede concluir que a medida que el escenario es más restrictivo en términos de demanda energética, el comportamiento ambiental mejora. Los impactos ambientales registrados en el escenario 3 son inferiores en todas las categorías evaluadas.

La fase de uso resulta dominante en todos los escenarios planteados, excepto para el escenario E3, que en las categorías de Potencial de calentamiento global (GWP), el Potencial de agotamiento de los recursos abióticos de combustibles fósiles (ADP- fossil) y el Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos del ozono troposférico (POCP), donde la etapa de rehabilitación tiene una repercusión del 37%, 51% y 40% respectivamente. Tras la valoración monetaria, la repercusión sobre el coste ambiental total es del 34%.

5.5.3.5. Evaluación del comportamiento económico

La Figura 5.58 presenta los valores actuales de los flujos de caja a lo largo de la vida útil de los escenarios evaluados. Los escenarios E1 y E2 son los que menor coste de inversión requieren. Sin embargo, también consiguen los menores ahorros (año 50, es decir, VAN). Al contrario, los escenarios E2B y E3 son los que mayores ahorros consiguen. No obstante, el coste de inversión de E3 es casi un 50% mayor que E2B, lo que provoca que el periodo de amortización se alargue unos 8 años, siendo de 22 años. Los resultados muestran un periodo de amortización de 14 años para los escenarios E1, E2A y E2B.

Figura 5.58. Valor actual (VA) de los flujos de caja de los escenarios de rehabilitación en Sevilla a lo largo de la vida útil. Fuente: elaboración propia.

5.5.3.6. Optimización multicriterio

En la Figura 5.59 se muestran los resultados de la optimización multicriterio para los cuatro escenarios de rehabilitación. En relación al primer objetivo, donde se busca la mínima inversión ambiental y los máximos ahorros ambientales de ciclo de vida, es posible concluir que el escenario E1 no es adecuado. El coste ambiental inicial es mayor al de los escenarios E2A y E2B, mientras que los ahorros de ciclo de vida son menores.

Los resultados relativos al segundo objetivo, mínima inversión económica y máximos ahorros económicos del ciclo de vida, muestran que, a priori, los cuatro escenarios son adecuados, ya que se sitúan en la curva de Pareto. Sin embargo, el escenario E3 tiene un coste de inversión mayor que E2B, con unos ahorros de ciclo de vida son muy similares. Por lo que, dado que no presenta ninguna ventaja sobre el escenario anterior, se considera que este escenario no es adecuado.

Respecto al tercer objetivo, los distintos escenarios presentan poca diferencia en la relación del coste de inversión y los ahorros ambientales de ciclo de vida, con la excepción del escenario E3, que presenta una mayor diferencia en el coste de inversión. Una vez que se han expuesto los resultados obtenidos, se puede concluir que los escenarios E1 y E3 no son adecuados.

Figura 5.59. Resultados de la optimización multicriterio en Sevilla, en base a los objetivos definidos. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.); coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro); coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad se han realizado variando la vida útil (30 y 60 años), la tasa de descuento (2% y 4%), el crecimiento del precio de la energía (1,75% y 0%), así como los valores monetarios (valores inferiores y superiores).

La variación de los parámetros de vida útil y valores monetarios no afectan las decisiones tomadas en relación a los resultados ambientales, ya que si bien presentan diferencias en los resultados, la tendencia y la relación entre ambos escenarios es similar (Figura 5.60).

Figura 5.60. Análisis de sensibilidad de los valores monetarios y la vida útil en Sevilla. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) para valores de monetización inferiores, centrales y superiores (izda.); coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Los parámetros económicos, sin embargo, muestran que si el incremento del precio de la energía se reduce, o la vida útil considerada es de 30 años, el escenario E3 deja de ser adecuado (Figura 5.61). Esto ratifica la decisión tomada anteriormente, que se descartaba el escenario E3, debido a su mayor coste de inversión y su escaso aporte en los ahorros económicos.

Figura 5.61. Análisis de sensibilidad de la tasa de descuento en Sevilla. Coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para distintas tasas de crecimiento del precio de la energía (3,5%, 1,75% y 0%) (izda.); coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para vidas útiles de 30, 50 y 60 años (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Asimismo, si la tasa de descuento es superior a la estimada (4%), el escenario E3 no es adecuado (Figura 5.62). El resto de escenarios, por el contrario, mantienen la misma tendencia.

Figura 5.62. Análisis de sensibilidad de la tasa de descuento en Sevilla. Coste de inversión (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) para distintas tasas de descuento (2%, 3% y 4%). Fuente: elaboración propia.

5.5.4. Conclusiones del caso de estudio de Sevilla

A partir de este caso de estudio, se puede concluir que las estrategias habituales empleadas en Sevilla para la rehabilitación de viviendas no son adecuadas si se aplican en la tipología estudiada. Esto se debe a que es posible cumplir la demanda conseguida con soluciones más económicas y con menor coste ambiental. El escenario E2A presenta unos resultados energéticos similares. Sin embargo, debido a las bajas exigencias de Código Técnico, no es necesario sustituir las ventanas orientadas a sur, que en este caso, representan un 40% de los huecos totales. Esto supone un ahorro ambiental y económico significativo.

Por otro lado, el escenario E3 tampoco es adecuado desde el punto de vista económico. Si bien es el escenario que mayor ahorro energético presenta, el sobre coste de inversión, mantenimiento y sustitución de los equipos de ventilación mecánica durante la vida útil del edificio, hacen que su idoneidad se vea mermada.

Los escenarios que cumplen los objetivos planteados en la presente investigación, así como los análisis de sensibilidad, son los escenarios E2A y E2B. En función del objetivo de la rehabilitación se elegirá un escenario u otro. El primero destaca por su menor coste de inversión (34%), aunque eso genera unos ahorros ambientales y económicos también menores (65% y 68% respectivamente). Por tanto, si es una Comunidad de Propietarios con bajos recursos económicos la que está detrás de la rehabilitación, probablemente elija el escenario E2A. Por el contrario, si se trata de una Administración Pública que priorice la consecución de los máximos ahorros ambientales, elegirá el escenario E2B.

Los análisis de sensibilidad se han aplicado con el fin de estimar cómo afectan al resultado final las hipótesis formuladas en el estudio. En este caso, se ha observado que la variación de la vida útil y los valores monetarios no tiene gran repercusión en la toma de decisiones. Sin embargo, la reducción de la vida útil o el incremento del precio de la energía, así como el aumento de la tasa de descuento, implican que el escenario E3 no sea favorable, si bien es cierto que en el estudio económico se había cuestionado su idoneidad, ya que los ahorros con respecto al escenario anterior (E2B) eran mínimos (1%), en comparación con el coste de inversión (63%).

5.6. Comparación de los casos de estudio

Una vez analizada la rehabilitación actual, así como las diversas políticas de eficiencia energética aplicadas en los casos de estudio seleccionados en la presente investigación, se ha realizado una comparación de los resultados relativos a las tres ciudades. Esta comparación debe realizarse contemplando las limitaciones que conlleva la evaluación de ciudades con distintas severidades climáticas en invierno y verano. El análisis parte de los resultados energéticos, comparando la relación entre los distintos escenarios para Madrid, Sevilla y Bilbao. Posteriormente, se comparan de manera independiente los resultados de la optimización multicriterio de cada escenario para las tres ciudades.

5.6.1. Resultados energéticos

Los resultados de demanda energética (Figura 5.63) muestran que Bilbao es el único caso en el que el escenario E1, es decir, las estrategias actuales de rehabilitación, consigue mayores reducciones que lo exigido por el Código Técnico actualmente para rehabilitación (E2A). Esto es debido a que las exigencias para obtener subvenciones han sido mayores. Mientras en Madrid y Sevilla se debían alcanzar las transmitancias térmicas proporcionadas por el CTE, en Bilbao, se exigía alcanzar una certificación energética de “C”.

Figura 5.63. Análisis comparativo de la demanda energética total (calefacción + refrigeración) de las ciudades analizadas según los escenarios de rehabilitación. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las exigencias del CTE para rehabilitación (E2A) y obra nueva (E2B), se observan algunas diferencias entre Bilbao y Madrid. Si bien en el escenario E2A Bilbao

tiene mayor demanda que Madrid (las transmitancias térmicas de la envolvente son menores para Madrid que para Bilbao), en el escenario E2B la demanda de Bilbao es menor, debido a que la exigencia es mayor para Bilbao ($20,19 \text{ kWh/m}^2$) que para Madrid ($27,37 \text{ kWh/m}^2$). Por último, el escenario E3 presenta en todos los casos los mejores resultados debido a que la demanda energética de este escenario es menor.

En cuanto al consumo de energía primaria total, se observa que la fase de uso tiene una gran repercusión para las tres ciudades (Figura 5.64), por lo que, en cada una de las ciudades analizadas, los resultados guardan gran relación con los resultados de demanda energética (Figura 5.63). Cabe destacar, la influencia del vector energético, que, en el caso de Sevilla, provoca que el consumo, inicialmente inferior al de Bilbao, resulte superior. La repercusión de la energía embebida oscila entre 4% y 10% en Madrid, entre 9% y 21% en Bilbao y entre 3% y 12% en Sevilla.

Figura 5.64. Análisis comparativo del consumo de energía primaria de ciclo de vida (CED) de los escenarios de rehabilitación. Fuente: elaboración propia.

5.6.2. Optimización multicriterio

5.6.2.1. Escenario E1: Estrategias actuales de rehabilitación

La Figura 5.65 presenta la comparación del escenario E1 en Madrid, Bilbao y Sevilla. Si bien las medidas de rehabilitación aplicadas en Bilbao en este caso de estudio resultaban adecuadas, al comparar los resultados con Madrid y Sevilla, se observa que Bilbao siempre está a la derecha en el gráfico. Esto es debido fundamentalmente al empleo de fachada ventilada en lugar de SATE que, desde el punto de vista económico, requiere mayor inversión. Asimismo, el impacto ambiental inicial también es mayor, debido a la subestructura de aluminio. Si bien pudiera justificarse su uso por las condiciones climáticas de Bilbao, la motivación para su elección, en base a las memorias estudiadas, viene determinada por temas estéticos, ya que permite al arquitecto mayor libertad de diseño.

Figura 5.65. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro) y coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.) de las soluciones de rehabilitación del escenario E1, en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista ambiental, Madrid tiene un coste ambiental inicial equivalente Sevilla, mientras que debido a las diferencias climáticas, el ahorro energético es mayor y los ahorros ambientales son mayores. Sin embargo, y pese a que los ahorros energéticos en Sevilla son muy inferiores en comparación con Madrid y Bilbao, el tipo de energía utilizada en la climatización (electricidad), hace que los ahorros económicos sean mucho mayores. Actualmente, el precio del kWh de electricidad duplica el precio del kWh de gas natural (0,186 €/kWh frente a 0,0752 €/kWh). Además, la tasa de incremento anual es mucho mayor (3,5% frente a 5%).

De este escenario se puede concluir que, a pesar de que una solución de rehabilitación presente mayores reducciones de consumo de energía primaria, no implica que sea una

solución adecuada si se aplica la metodología multicriterio desarrollada. Este es el caso del escenario E1 en Bilbao donde, pese a que a priori parece que las soluciones de rehabilitación son mejores (los ahorros anuales de energía primaria son mayores), las soluciones constructivas empleadas, al compararlas con Madrid y Sevilla, no son buenas desde el punto de vista ambiental y económico.

Por otro lado, los ahorros económicos dependen en gran medida del tipo de energía utilizada. Actualmente, las diferencias del precio de la energía y su incremento anual son tan amplias, que los ahorros de electricidad tienen mayor influencia en los resultados económicos que los de gas natural.

5.6.2.2. Escenario E2A: CTE DB-HE (rehabilitación)

Figura 5.66. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro) y coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.) de las soluciones de rehabilitación del escenario E2A, en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5.66 se muestran los resultados de la optimización multicriterio del escenario E2A para las ciudades de Madrid, Bilbao y Sevilla. Debido a las bajas exigencias de este escenario y a la baja severidad climática en invierno de Sevilla, ha sido posible abaratar ambiental y económicamente la rehabilitación. Por tanto, si bien los ahorros ambientales son menores que en Madrid, el coste ambiental inicial también lo es.

Al igual que ocurría en el escenario anterior, Bilbao se sitúa siempre a la derecha del gráfico, lo que significa que el coste ambiental y económico inicial es superior al resto de casos. La fachada ventilada, penaliza una vez más estos resultados.

Tal y como se ha observado en el escenario E1, los ahorros ambientales guardan gran relación con los ahorros energéticos en relación al edificio sin rehabilitar. Sin embargo, los ahorros económicos dependen en gran medida del tipo de energía utilizado.

Actualmente la diferencia del precio entre la electricidad y el gas natural es tan relevante, que los ahorros de electricidad tienen mayor influencia en los resultados económicos.

5.6.2.3. Escenario E2B: CTE DB-HE (nueva edificación)

Los resultados de este escenario (Figura 5.67) muestran unas conclusiones muy similares a los escenarios anteriores.

Figura 5.67. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro) y coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.) de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B, en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

5.6.2.4. Escenario E3: Estándar Passivhaus

La mayor diferencia encontrada en este escenario es el resultado de Sevilla. Debido a la dificultad de reducir la demanda de refrigeración en Sevilla, la presencia de protecciones solares metálicas en las orientaciones sur, este y oeste, conlleva un aumento del coste inicial ambiental y económico, superando a Madrid y siendo similar al de Bilbao. Por lo que, si bien este escenario no era favorable en ninguna ciudad, queda patente su peor comportamiento en Sevilla.

Figura 5.68. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro) y coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.) de las soluciones de rehabilitación del escenario E2B, en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

5.6.3. Conclusiones de la comparación de los casos de estudio

Una vez evaluados los casos de estudio de forma independiente, se ha realizado una comparación por escenarios. Debido a las diferencias climáticas, el análisis comparativo abordado ha tratado de ver en cada escenario cómo respondían los tres casos de estudio a los requisitos de cada uno de los escenarios.

Una conclusión que se ha repetido en todos los escenarios es que los ahorros ambientales de ciclo de vida guardan gran relación con los ahorros energéticos, mientras que los ahorros económicos de ciclo de vida guardan mayor relación con el tipo de energía utilizada. La electricidad es más cara que el gas natural y tiene una mayor tasa de crecimiento anual, por lo que en todos los casos estudiados, los ahorros económicos finales de Sevilla eran mayores, pese a tener unos ahorros energéticos menores. El cambio de vector energético no tiene gran influencia en los resultados ambientales. No obstante, sí se observa una gran influencia en el consumo de energía primaria total de ciclo de vida (CED), donde en el caso de Sevilla, el consumo de energía primaria en la fase de uso aumenta notablemente con respecto a Madrid y Bilbao, debido al uso de electricidad en calefacción.

Los resultados muestran cómo el contemplar el Ciclo de Vida integrando las variables ambiental y económico, puede conducir a una variación en la selección de las soluciones. En el escenario E1, por ejemplo, Bilbao es el que mayores ahorros energéticos tiene. Sin embargo, la solución constructiva empleada hace que el coste ambiental inicial y el coste de inversión aumenten, reduciendo sus ahorros de ciclo de vida totales. Por lo tanto, y a pesar de que en la presente investigación se ha limitado el tipo de soluciones constructivas a las más habituales en cada localidad, se ha demostrado que el integrar la perspectiva de Ciclo de Vida ambiental y económica en la evaluación de las soluciones de rehabilitación, hace cuestionar si las soluciones que se están planteando son eficientes y si las políticas de rehabilitación son adecuadas.

5.7. Conclusiones

El trabajo desarrollado en este capítulo responde a un doble objetivo formulado:

- Abordar la descripción de las implicaciones metodológicas de la propuesta formulada, a través de casos de estudio que ilustren su viabilidad y características básicas de aplicación.
- Contribuir al debate sobre la rehabilitación llevada a cabo a nivel nacional en los últimos años, evaluando si las actuaciones habituales de rehabilitación representan una mejora real y si las políticas de rehabilitación, aplicadas a la edificación residencial, son pertinentes.

La propuesta metodológica de evaluación multicriterio planteada ha permitido evaluar, en cada ciudad, qué soluciones de rehabilitación parecen adecuadas desde el punto de vista ambiental y económico. Tras la aplicación de la metodología en los casos de estudio, se observa que el método de optimización de Pareto es adecuado para identificar las soluciones adecuadas, buscando la mínima inversión y los máximos ahorros de ciclo de vida. En este sentido, la valoración monetaria ha facilitado la combinación de los resultados ambientales y económicos. Este método tiene sus limitaciones y debido a que se trata de un método de valoración, los resultados pierdan objetividad. No obstante, dada la falta de armonización en la normalización y ponderación de los impactos ambientales, la valoración monetaria elegida permite el uso de la única métrica, de manera transparente y holística. Además, frente a otros métodos de agregación, presenta la ventaja de que los costes ambientales pueden compararse o sumarse a los costes económicos. En la metodología propuesta se ha decidido no sumar los costes ambientales y económicos ya que en función de quién esté detrás de la rehabilitación o del objetivo de la misma, pueden tener prioridad los aspectos ambientales o los económicos.

En respuesta al segundo de los objetivos planteados, los casos de estudio se han seleccionado buscando que la rehabilitación se aplicase sobre un edificio representativo del parque residencial existente, situado en tres localidades con un gran número de viviendas con prioridad de rehabilitación en el corto plazo y con condiciones climáticas diferenciadas. Adicionalmente, los escenarios de rehabilitación propuestos representan distintas políticas de rehabilitación o aplicables a la rehabilitación, desde las soluciones habituales de rehabilitación hasta el estándar Passivhaus, pasando por la aplicación del Código Técnico para rehabilitación y nueva edificación.

Se ha observado que las estrategias de rehabilitación habituales, aplicadas en el edificio tipo analizado, no son recomendables desde el punto de vista ambiental y económico en ninguna de las tres ciudades. Los resultados de Bilbao revelaban que estas soluciones eran adecuadas debido a la mayor exigencia para la concesión de las ayudas. Sin embargo, al comparar con Madrid y Sevilla, se ha cuestionado la idoneidad de las soluciones, debido al incremento del coste de inversión ambiental y económica. Se puede concluir que, a pesar de que una rehabilitación suponga una importante reducción en el uso de energía operacional del edificio, debe considerarse la evaluación ambiental y económica a lo largo del ciclo de vida completo para saber si esa mejora es real. Esta visión debería incluirse, por tanto, en las políticas de rehabilitación, que en este escenario, serían las políticas desarrolladas para la concesión de ayudas económicas que promuevan la rehabilitación.

En relación al cumplimiento del CTE para rehabilitación, cuya aplicación entró en vigor en 2013 tras la actualización del mismo, se ha observado que las exigencias de demanda energética son bajas. Esto implica que en climas con una severidad climática media-alta en invierno, en el tipo de edificio analizado, la rehabilitación no es adecuada. Una vez que se rehabilita la envolvente, la inversión ambiental y económica extra para llegar a un escenario de aislamiento mayor es baja, en comparación con los ahorros ambientales y económicos de ciclo de vida. En climas como el de Sevilla, con una baja severidad climática en invierno, las bajas exigencias del CTE han permitido abaratar la rehabilitación, dado que los huecos orientados a sur no era necesario rehabilitar, porque cumplían con la transmitancia exigida por el CTE. En este edificio, éstos representaban el 40% de los huecos totales.

Una mayor exigencia, como se ha expuesto anteriormente, permite que las soluciones sean adecuadas en las tres ciudades (escenario E2B: cumplimiento del CTE-obra nueva). Sin embargo, no siempre un aumento de exigencia supone una mejora. Este es el caso del estándar Passivhaus. En Europa hay algún país que considera este estándar para la definición del edificio de consumo de energía casi nulo. La Directiva Europea 2010/31/UE define el edificio de consumo de energía casi nulo, como aquel edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto, en el que la cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida «in situ» o en el entorno (Comisión Europea, 2010). En España todavía no existe una definición y, en consecuencia, no se han determinado los criterios que se van a considerar y cómo se va a determinar si un edificio es de consumo de energía casi nulo, y menos aplicado a la rehabilitación, donde el edificio existente supone un fuerte condicionante en la reducción del consumo de energía. Los resultados de la presente

investigación revelan la importancia de incluir la evaluación del ciclo de vida completo del edificio en la definición del edificio de consumo de energía casi nulo.

Por último, destacar que el vector energético es determinante para el coste, así como para el consumo de energía primaria de ciclo de vida, pero no presenta una influencia tan significativa en el impacto ambiental. En cada escenario, el vector energético considerado es el mismo, por lo que no tiene gran influencia en la toma de decisiones. Sí podría ser determinante si se están valorando distintos sistemas de acondicionamiento con fuentes de energía diferenciadas.

5.8. Bibliografía

ALLACKER, K., DEBACKER, W., DELEM, L., DE NOCKER, L., DE TROYER, F., JANSSEN, A., PEETERS, K., SERVAES, R., SPIRINCKX, C. y VAN DESSEL, J., 2013. *Environmental Profile of Building elements*. Mechelen. Disponible en: <http://www.ovam.be>.

BLOM, I., ITARD, L. y MEIJER, A., 2010. LCA-based environmental assessment of the use and maintenance of heating and ventilation systems in Dutch dwellings. *Building and Environment*, vol. 45, no. 11, pp. 2362-2372. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2010.04.012.

COMISIÓN EUROPEA, 2010. Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Diario Oficial de la Unión Europea*, vol. L 153, pp. 13-35.

COMISIÓN EUROPEA, 2012. Directrices que acompañan al Reglamento Delegado (UE) n° 244/2012 de la Comisión, de 16 de enero de 2012, que complementa la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la eficiencia energética de los edificios, estableciendo un marco metodológico comparativo para calcular los niveles óptimos de rentabilidad de los requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios y de sus elementos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, vol. C 115, pp. 1- 28.

DE NOCKER, L. y DEBACKER, W., 2015. Annex: update monetisation of the MMG method (2014). Mechelen.

DEBACKER, W., ALLACKER, K., SPIRINCKX, C., GEERKEN, T. y DE TROYER, F., 2013. Identification of environmental and financial cost efficient heating and ventilation services for a typical residential building in Belgium. *Journal of Cleaner Production*, vol. 57, pp. 188-199.

ECOINVENT CENTRE, 2010. *The ecoinvent version 2.2 database*. Disponible en: <http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-2/ecoinvent-version-2.html>.

EUROSTAT, 2009a. Electricity prices for domestic consumers - bi-annual data (until 2007). [Consulta: 20 abril 2015]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>.

EUROSTAT, 2009b. Gas prices for domestic consumers - bi-annual data (until 2007). [Consulta: 20 abril 2015]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>.

EUROSTAT, 2015a. Electricity prices for domestic consumers - bi-annual data (from 2007 onwards). [Consulta: 20 abril 2015]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>.

EUROSTAT, 2015b. Gas prices for domestic consumers - bi-annual data (from 2007

onwards). [Consulta: 20 abril 2015]. Disponible en:

<http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>.

FRISCHKNECHT, R., JUNGBLUTH, N., ALTHAUS, H.-J., DOKA, G., DONES, R., HECK, T., HELLWEG, S., HISCHIER, R., NEMECEK, T., REBITZER, G. y SPIELMANN, M., 2005. The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 10, no. 1, pp. 3-9. ISSN 0948-3349. DOI 10.1065/lca2004.10.181.1.

FRISCHKNECHT, R., JUNGBLUTH, N., ALTHAUS, H.J., DOKA, G., DONES, R., HISCHIER, R., HELLWEG, S., HUMBERT, S., MARGNI, M., NEMECEK, T. y SPIELMANN, M., 2007. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0. ecoinvent report No. 3. Swiss centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.

FRISCHKNECHT, R. y REBITZER, G., 2005. The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database. *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, no. 13-14, pp. 1337-1343. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2005.05.002.

GARCÍA MARTÍNEZ, A., 2010. *Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de Edificios. Propuesta metodológica para la elaboración de Declaraciones Ambientales de Viviendas en Andalucía*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. Sevilla.

GOBIERNO VASCO, 2012a. ORDEN de 18 de julio de 2012, del Consejero de Vivienda, Obras Públicas y Transportes, por la que se regula un programa de ayudas en materia de Rehabilitación de Viviendas y Edificios (Programa REVIVE), para la elaboración de Proyectos de Intervención en el Patrimonio Edificado, de la Comunidad Autónoma del País Vasco y la ejecución de las obras derivadas de los mismos. *Boletín Oficial de País Vasco*, no. 146, pp. 2012/3475 1-15.

GOBIERNO VASCO, 2013. ORDEN de 31 de julio de 2013, del Consejero de Empleo y Políticas Sociales, por la que se convoca y regula el programa de ayudas del Plan Renove en materia de Rehabilitación eficiente de Viviendas y Edificios, para la elaboración de Proyectos de Intervención en el Patrimonio Edificado, de la Comunidad Autónoma del País Vasco y la ejecución de las obras derivadas de los mismos. *Boletín Oficial de País Vasco*, no. 157, pp. 2013/3670 1-16.

IDAE, 2009a. CALENER-GT: Grandes edificios terciarios. Manual de Referencia. Madrid.

IDAE, 2009b. Condiciones de aceptación de Procedimientos alternativos a LIDER y CALENER. Madrid.

IDAE, 2011. Escala de calificación energética para edificios existentes. Madrid.

IDAE, 2012. Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3. *Calificación de Eficiencia Energética de Edificios*. Madrid.

IDAE, 2014. Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso de energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector edificios en España.

INE, 2015. Índices de precios de materiales de la construcción y nacionales de la mano de obra. [Consulta: 20 mayo 2004]. Disponible en: www.ine.es.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, 2008. Encuesta de Hogares y Medio Ambiente 2008. Disponible en:
<http://www.ine.es/dynt3/inebase/index.htm?type=pcaxis&path=/t25/p500/2008/p01/&file=pcaxis#2>.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, 2015. Censos de Población y Viviendas 2011. Disponible en: http://www.ine.es/censos2011_datos/cen11_datos_inicio.htm.

ISO 14040, 2006. *Gestión ambiental Análisis del ciclo de vida Requisitos y directrices*.

MINISTERIO DE ECONOMÍA, 2003. *Orden ECO/805/2003, de 27 de marzo, sobre normas de valoración de bienes inmuebles y de determinados derechos para ciertas finalidades financieras*. BOE núm 85.

MINISTERIO DE FOMENTO, 2013. *CTE DB-HE, Documento Básico HE Ahorro de energía*. España.

MINISTERIO DE FOMENTO, 2013. *DA DB-HE / 1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente*.

ORTIZ, O., PASQUALINO, J.C. y CASTELLS, F., 2010. Environmental performance of construction waste: Comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. *Waste management*, vol. 30, no. 4, pp. 646-54. ISSN 1879-2456. DOI 10.1016/j.wasman.2009.11.013.

PÉREZ GONZÁLEZ, M., 2015. *Determinación y caracterización de los indicadores que intervienen en un sistema integral de iluminación natural y protección solar. Aplicado a la incorporación de bandejas en los huecos de fachadas existentes*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

POMBO, O., ALLACKER, K., RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. Sustainability assessment of energy saving measures: a multi-criteria approach for residential buildings retrofitting—A case study of the Spanish housing stock. *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 384-394. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.01.019.

POMBO, O., NEILA, J. y RIVELA, B., 2014. Vivienda de posguerra en España. La rehabilitación como herramienta para una arquitectura más sostenible. *Ambitat*, no. 14, pp. 7-13.

POMBO, O., RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook. *Journal of Cleaner*

Production, vol. 123, pp. 88-100. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.06.137.

PRECIOS CENTRO, 2014. *Pecrio Centro de la construcción Guadalajara 2014*. Guadalajara: Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Guadalajara. ISBN 9788495344755.

RD 105/2008, 2008. Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión. , pp. 7724-7730.

RIVELA, B., 2012. *Propuesta metodológica de aplicación sectorial de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la evolución ambiental de la edificación en España*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

SAINT-GOBAIN, 2012. Declaration Environnementale et Sanitaire conforme a la Norme NF P 01-010. . Disponible en:

http://www.inies.fr/Upload/2261_sgg_climaplus_4s_fr_v2.2_05_2012.pdf.

UNE-EN 15804+A1, 2014. *Sostenibilidad en la construcción - Declaraciones ambientales de producto - Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción*.

UNE-EN 15978, 2012. *Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo*.

UNE-EN 16627, 2015. *Sostenibilidad en la obras de construcción. Evaluación del comportamiento económico de los edificios. Métodos de cálculo*.

WWF ESPAÑA, 2013. Observatorio de la Electricidad Año 2013. Disponible en: http://www.wwf.es/que_hacemos/cambio_climatico/nuestras_soluciones/energias_renovables/observatorio_de_la_electricidad/

Capítulo 6

Conclusiones y futuras líneas de investigación

Conclusions and future outlook

El presente capítulo resume las conclusiones de mayor relevancia, estructuradas en cinco secciones: la revisión crítica de las metodologías de evaluación, la metodología propuesta para evaluar las soluciones de rehabilitación, la rehabilitación en el momento actual, los escenarios de rehabilitación y las conclusiones generales, que han permitido la confirmación de la hipótesis planteada en la investigación.

Adicionalmente, se esbozan las futuras líneas de investigación que se han considerado prioritarias en el ámbito temático abordado.

El capítulo finaliza con la descripción de la producción científica, que ha permitido tener desde el comienzo del trabajo una continua retroalimentación de revisores internacionales, aportando calidad al trabajo.

The present chapter summarizes the most relevant conclusions, organized in five sections: critical review of the assessment methodologies, proposed methodology for the evaluation of the energy saving measures, current renovation, retrofitting scenarios and general conclusions, which have made it possible to verify the hypothesis of the present research.

Moreover, future outlook has been outlined, according to the priority actions considered within the thematic area of the current study.

The chapter ends with the description of the dissemination of knowledge, which has been conducted from the beginning of the study, providing continuous feedback from international reviewers, improving the quality of the work.

6.1. Conclusiones de la revisión crítica de las metodologías de evaluación

Con el fin de identificar el estado de la cuestión y las necesidades metodológicas de la aplicación del Enfoque de Ciclo de Vida en rehabilitación, se ha realizado una revisión crítica de los trabajos más relevantes en esta materia. A la luz de las publicaciones analizadas, se constata que, si bien existe cierto consenso en las estrategias de rehabilitación, las metodologías y criterios considerados en la evaluación difieren ampliamente. Algunos autores consideran únicamente los impactos ambientales, otros evalúan exclusivamente la perspectiva económica, mientras que los parámetros sociales son excluidos con carácter general de la evaluación.

Las investigaciones analizadas ponen de manifiesto la necesidad prioritaria de armonización metodológica, considerando el Enfoque de Ciclo de Vida para posibilitar la optimización de las soluciones de rehabilitación y la evaluación del potencial real de mejora que representa la intervención en la edificación residencial. Es evidente que cuando se mejora la eficiencia energética de un edificio debido a la implementación de medidas de rehabilitación, se reduce el consumo energético durante la fase de uso, adquiriendo mayor relevancia el resto de fases del ciclo de vida, pudiendo llegar a ser comparables a la etapa de uso (Ardente et al., 2011; Chen et al., 2001). Esto se aprecia en algunos resultados de la presente investigación, como por ejemplo el caso de estudio de Sevilla, donde para el escenario E3 (cumplimiento del estándar Passivhaus), los resultados revelan que la fase de rehabilitación tiene una enorme influencia (34%) en el coste ambiental total. Este porcentaje es muy relevante, ya que se manifiesta en el año cero, mientras que el 66% restante sucede de manera continua lo largo de los 50 años restantes.

Por otro lado, la multiplicidad de puntuaciones individuales de impactos ambientales no parece un punto de partida adecuado para posibilitar la toma de decisiones. La fragmentación de los resultados ambientales en varias categorías de impacto no sólo dificulta la evaluación global del comportamiento ambiental, sino que problematiza de manera adicional su combinación con los resultados económicos. La revisión realizada pone de manifiesto la falta de armonización en los métodos de normalización y ponderación de impactos, así como la variedad de metodologías de cálculo de los costes ambientales, que no sólo reducen la transparencia de los resultados, sino que también los vuelve inciertos y subjetivos, dificultando la comparabilidad de los mismos (Pombo et al., 2014).

En síntesis, este análisis ha permitido identificar:

- la necesidad de armonización metodológica;
- las bases metodológicas y las hipótesis de partida ya consensuadas y asentadas en la comunidad científica, que han sido contempladas en la metodología propuesta para la evaluación ambiental y económica de las estrategias de rehabilitación: vida útil, límites del sistema, indicadores ambientales y económicos, métodos de cálculo, análisis de sensibilidad y métodos de optimización de los indicadores ambientales y económicos.

6.2. Conclusiones de la metodología propuesta para evaluar de las soluciones de rehabilitación

El análisis de la situación actual pone de manifiesto la necesidad de adaptación a un escenario donde las exigencias relativas a la eficiencia energética de la edificación son cada vez mayores, y la etapa de construcción adquiere consecuentemente una paulatina mayor importancia. En este contexto, se evidencia que no es suficiente evaluar la rehabilitación únicamente atendiendo a los consumos de vida útil: incorporar el Enfoque de Ciclo de Vida es necesario para poder estimar el potencial real de mejora que tiene la rehabilitación del parque edificatorio.

La atención del trabajo de investigación desarrollado se ha centrado en el ámbito de la evaluación energética, ambiental y económica de la rehabilitación residencial, con el objetivo principal de plantear una metodología de evaluación, que incorpore estos tres criterios desde la perspectiva de Ciclo de Vida. En el capítulo 5 se ilustra la aplicación de la metodología de evaluación en tres casos de estudio, donde se analizan cuatro escenarios de rehabilitación para un edificio tipo, con cierta representatividad en el parque edificatorio español, situado en tres localidades con climas diferenciados. Se puede concluir, que la metodología propuesta posibilita la aplicación del Enfoque de Ciclo de Vida, integrando las variables ambiental y económica.

La propuesta integra las bases metodológicas y las hipótesis de partida ya consensuadas, tanto en la comunidad científica como a nivel normativo. El gran potencial de la presente investigación radica en la propuesta metodológica desarrollada, que constituye una herramienta fundamental para dar respuesta a las necesidades de definición de criterios de política pública pertinentes, considerando una aproximación holística. La aplicación de este método permite definir criterios de selección, de qué acciones deberían ser susceptibles de ser subvencionadas, así como el importe a subvencionar para que una rehabilitación resulte amortizable para el usuario, dado que, como se ha observado a través de los casos de estudio, los periodos de amortización son extensos (en los casos analizados oscila entre 14 y 37 años).

En relación a la combinación del ACV y CCV, se observa que el método de optimización de Pareto resulta adecuado para la optimización multicriterio. En la presente investigación, este método ha posibilitado determinar las soluciones más adecuadas desde el punto de vista ambiental y económico, buscando aquellas con un coste inicial mínimo y unos ahorros de ciclo de vida máximos.

La aplicación de la metodología de evaluación multicriterio propuesta ha constatado la necesidad de considerar los resultados ambientales como resultados expresados en una puntuación única para facilitar la toma de decisiones. Sin embargo, como ya concluía Rivela en su tesis doctoral, no existe un método científico que permita llegar a un único valor en el que se mezclen prioridades humanas -como la posible afección de cáncer- con el deterioro del ecosistema: el conflicto de valoración que se hace necesario abordar para llegar a una puntuación final ha de resolverse en la esfera de las ponderaciones o priorizaciones, cuyo carácter es inevitablemente subjetivo (Rivela, 2012). En este sentido, el método de valoración monetaria adoptado se ha considerado como una alternativa adecuada, dado que permite una optimización holística y transparente, explicitando los criterios y procedimientos aplicados para llegar a una única puntuación final. Adicionalmente, los costes ambientales pueden compararse o sumarse a los costes económicos, lo que presenta una ventaja frente a otros métodos de agregación. En este caso, y dado que el coste de inversión y los ahorros ambientales suelen ser factores determinantes en la toma de decisiones, se ha considerado más oportuno analizarlos de forma separada. No obstante, es necesario seguir avanzando en la discusión científica relativa a la armonización de los métodos de valoración y ponderación, así como en el desarrollo de factores de caracterización económica específicos del contexto. Cabe señalar que la metodología de evaluación multicriterio planteada fácilmente puede ser adaptada integrando los futuros avances científicos en estas líneas de investigación.

La revisión crítica ha revelado asimismo, que las metodologías de Ciclo de Vida presentan ciertas incertidumbres debido, principalmente, al largo periodo de evaluación. A la luz de los resultados obtenidos en los casos de estudio, se puede concluir que son los parámetros económicos los que mayor incertidumbre presentan. Se ha constatado que al reducir la vida útil o disminuir la tasa de crecimiento del precio de la energía, algunos escenarios identificados como preferibles, dejan de ser adecuados. Este hecho se observa también al aumentar la tasa de descuento. Por el contrario, la variación de los parámetros de vida útil o factor de monetización no provoca cambios de tendencia en los resultados ambientales.

Otro aspecto clave en la incertidumbre que presenta la aplicación de ACV y, en consecuencia, los resultados obtenidos, es el acceso a datos fiables y representativos. A pesar de los esfuerzos realizados en los últimos años por desarrollar bases de datos adaptadas al contexto español, todavía no existen bases de datos con un abanico suficientemente amplio de datos relativos a los materiales de construcción. En este sentido, se espera que iniciativas prometedoras como el actual desarrollo de la base de datos OpenDAP, en el marco del proyecto experimental europeo *inData*, contribuyan, a través del acceso a datos de calidad y representativos del contexto español, a reducir la incertidumbre de los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología propuesta.

6.3. Conclusiones de la rehabilitación actual

El estudio realizado sobre la rehabilitación actual del parque residencial permite constatar que la mejora de la eficiencia energética de los edificios existentes se ha llevado a cabo promovida principalmente por la existencia de ayudas económicas. Así, en el caso de Madrid, la mitad de las rehabilitaciones se han llevado a cabo debido a los informes desfavorables en la Inspección Técnica de los Edificios (ITE). Tras la necesidad de intervención sobre ciertos elementos de la envolvente, las comunidades de vecinos han aprovechado las ayudas económicas existentes, incluyendo soluciones de mejora térmica. Estas ayudas han sido gestionadas, en general, por las Comunidades Autónomas, con distintas exigencias y cuantías de subvención.

En Madrid y Sevilla, los requisitos para la concesión de las ayudas se han centrado en una pequeña mejora de la transmitancia térmica global de la envolvente o del elemento a rehabilitar. No se ha exigido en ningún caso la rehabilitación integral y tan sólo se ha valorado la mejora de la transmitancia térmica de aquellos elementos sobre los que se ha intervenido. Por ello, la rehabilitación integral en los casos analizados en estas dos ciudades brilla por su ausencia. Esto supone una oportunidad perdida en la mejora de la eficiencia energética del parque edificado. En Bilbao, las exigencias de rehabilitación han sido mayores, ya que se ha exigido alcanzar una calificación de “C” en la certificación energética, así como la monitorización de las viviendas tras la rehabilitación. En consecuencia, las actuaciones han tenido un carácter más integral.

Cabe destacar la escasa variedad de soluciones identificada en las estrategias de rehabilitación implementadas. En cubierta, se ha utilizado la misma solución en Madrid, Bilbao y Sevilla, con la diferencia del espesor de aislamiento, que en Madrid ha sido algo mayor. Los huecos se han rehabilitado del mismo modo en Madrid y Sevilla, pese a las diferencias climáticas que estas dos ciudades presentan, especialmente en relación a las condiciones climáticas de invierno. Asimismo, no se han instalado elementos de protección solar. En relación a la fachada, se observa que cada ciudad presenta una solución diferente. Sin embargo, dentro de cada una de ellas apenas existe variedad, lo que lleva a plantearse la falta de reflexión en torno a la rehabilitación.

En resumen, el análisis realizado ha permitido identificar las principales soluciones que han sido aplicadas Madrid, Bilbao y Sevilla, poniendo de manifiesto la falta de reflexión en torno a la rehabilitación y lo inadecuado del planteamiento de las subvenciones.

6.4. Conclusiones de los casos de estudio

Los casos de estudio presentados en el capítulo 5 muestran la viabilidad de aplicación de la propuesta metodológica para la evaluación de las soluciones de rehabilitación. Por una parte, posibilitan abordar la descripción de las implicaciones metodológicas y las características básicas de aplicación. Por otra parte, los resultados obtenidos contribuyen al debate sobre la pertinencia de las prácticas de rehabilitación actuales y las políticas de rehabilitación que han sido objeto de estudio en las ciudades de Madrid, Bilbao y Sevilla.

Como se ha podido observar en el análisis comparativo de los casos de estudio, el vector energético es determinante para el coste económico y presenta una gran repercusión en el consumo de energía primaria del ciclo de vida de la edificación, siendo menor la influencia respectiva en el impacto ambiental. Dado que en la presente investigación se ha considerado el mismo vector energético en cada una de las ciudades, este hecho no ha repercutido significativamente en la evaluación de cada una de las ciudades separadamente. La contribución de los materiales a la dimensión ambiental varía entre un 3% y un 34% del impacto ambiental global.

A continuación se analizan las principales conclusiones del análisis de los escenarios analizados, para las tipologías residenciales estudiadas en Madrid, Bilbao y Sevilla. Si bien las conclusiones no se pueden ser extrapoladas con carácter general al parque construido, cabe destacar el esfuerzo realizado en la selección de los casos de estudio, buscando tener cierta representatividad de los contextos analizados.

Estrategias actuales de rehabilitación (E1)

En el caso de Madrid y Sevilla, se ha observado que las soluciones empleadas habitualmente no parecen adecuadas desde el punto de vista ambiental y económico. En las actuaciones revisadas, se ha detectado que las acciones están directamente relacionadas con la concesión de ayudas y las exigencias establecidas en política pública para esta concesión. Los resultados muestran que estas soluciones no tienen un comportamiento, que desde el punto de vista global, se considere adecuado entre los escenarios objeto de estudio; se aprecia que, para unos ahorros de ciclo de vida similares, existen escenarios en los que se reduce el coste de inversión ambiental y económica (p. ej. escenario E2A en Sevilla), o en los que con una inversión adicional baja, se consiguen ahorros muy superiores (p. ej. Escenario E2B en Madrid).

En Bilbao, por el contrario, las exigencias son mayores, hecho que, a priori, ha derivado en que los resultados obtenidos en la evaluación muestren que las acciones de

rehabilitación han sido más adecuadas. Sin embargo, al comparar los resultados con Madrid y Sevilla (Figura 6.1), se ha observado que las soluciones de Bilbao presentan un coste de inversión y un coste ambiental inicial muy superior, debido fundamentalmente al uso de la fachada ventilada.

Lo elevado de los costes iniciales pone igualmente en cuestión las soluciones empleadas en Bilbao, especialmente las soluciones de fachada. La instalación de la fachada ventilada en Bilbao pudiera justificarse por las condiciones climáticas de lluvia y humedad. No obstante, la justificación de su elección reflejada en las memorias de los proyectos, parece ser simplemente el hecho de que dotan al arquitecto de mayor flexibilidad para definir y renovar la imagen del edificio.

Figura 6.1. Coste ambiental inicial (IE) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (izda.), coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) (centro) y coste económico inicial (IF) vs. ahorros ambientales de ciclo de vida (LE) (dcha.) de las soluciones de rehabilitación del escenario E1, en Madrid, Bilbao y Sevilla. Fuente: elaboración propia.

En resumen, a la luz de los resultados obtenidos, considerando el edificio tipo analizado, puede postularse que las soluciones habituales de rehabilitación en Madrid, Bilbao y Sevilla, no parecen adecuadas desde el punto de vista ambiental y económico.

Cumplimiento del CTE-rehabilitación (E2A)

En este escenario se ha observado que las soluciones planteadas en Madrid y Bilbao no son adecuadas desde el punto de vista ambiental y económico. Esto es debido, una vez más, a la baja exigencia del CTE.

En el caso de Madrid (Figura 6.2), una pequeña inversión adicional (9%) permitiría alcanzar un escenario de aislamiento mayor (p. Ej. E2B), consiguiendo mayores ahorros ambientales (24%) y económicos (42%).

Figura 6.2. Relación entre el coste de inversión y los ahorros ambientales y económicos entre los escenarios E2A y E2B en Madrid. Fuente: elaboración propia.

Del mismo modo, en Bilbao, la inversión adicional necesaria para alcanzar un escenario de aislamiento mayor (p. ej. E2B) es baja (11%) en comparación con los ahorros ambientales (56%) y económicos (150%) extra (Figura 6.3) que se pueden obtener.

Figura 6.3. Relación entre el coste de inversión y los ahorros ambientales y económicos entre los escenarios E2A y E2B en Bilbao. Fuente: elaboración propia.

En Sevilla, sin embargo, los resultados indican que las soluciones de este escenario son adecuadas. Las bajas exigencias del CTE, unido a la baja severidad climática en invierno, hacen que las ventanas situadas en orientación sur, que suponen el 41% de los huecos existentes, cumplan con la transmitancia exigida por el Código Técnico. De este

modo, se ha podido abaratar la rehabilitación y generar menor impacto ambiental inicial. Por ello, la inversión adicional para un escenario de aislamiento mayor (E2B) crece un 51%, porcentaje similar en que crecen los ahorros ambientales (48%) y económicos (47%).

Figura 6.4. Relación entre el coste de inversión y los ahorros ambientales y económicos entre los escenarios E2A y E2B en Sevilla. Fuente: elaboración propia.

En síntesis, los resultados obtenidos para el tipo de edificio analizado, señalan que, este escenario no es adecuado para Bilbao y Madrid, ciudades con una severidad climática media y alta respectivamente, debido a las bajas exigencias del CTE. Sin embargo, estas bajas exigencias permiten reducir el coste ambiental y económico inicial en Sevilla, localidad con una severidad climática baja en invierno, presentando este escenario como adecuado.

Cumplimiento del CTE-nueva edificación (E2B)

Este escenario es el único en el que los resultados indican que la solución analizada resulta adecuada para Madrid, Bilbao y Sevilla. Esto, en el caso de Madrid y Bilbao, se explica dadas las mayores que exigencias, que sin embargo sólo requieren una inversión ligeramente superior. En el caso de Sevilla, se ha observado que el escenario anterior ya resultaba adecuado, manteniéndose esta tendencia en este escenario, en la medida que el incremento del coste se traduce en un incremento en los ahorros conseguidos.

Cumplimiento del estándar Passivhaus (E3)

Los resultados obtenidos descartan este escenario en las tres ciudades analizadas. El sobrecoste de inversión y los costes de mantenimiento y sustitución de los equipos hace que dicho escenario sea poco viable en términos económicos (Figura 6.5). Se puede concluir, por tanto, que el aumento de exigencia no siempre es una mejora desde el punto de vista global.

Figura 6.5. Coste económico inicial (IF) vs. ahorros económicos de ciclo de vida (LF) de los escenarios de rehabilitación en Madrid (izda.), Bilbao (centro) y Sevilla (dcha.). Fuente: elaboración propia.

Como conclusión final, la Tabla 6.1 muestra, a modo de resumen, la adecuación de las estrategias evaluadas para el edificio tipo seleccionado, describiendo cada uno de los escenarios analizados para las ciudades de Madrid, Bilbao y Sevilla, según las dimensiones energética, ambiental, económica, así como el resultado del análisis multicriterio. La valoración se ha expresado en una escala de + a +++ a medida que parece más adecuada, y – cuando no resulta recomendable.

Tabla 6.1. Resumen del nivel de adecuación de las estrategias adoptadas en los escenarios de rehabilitación propuestos, en Madrid, Bilbao y Sevilla.

		Evaluación energética	Evaluación ambiental	Evaluación económica	Evaluación multicriterio
MADRID	E1	+	-	-	-
	E2A	+	-	-	-
	E2B	++	++	++	++
	E3	+++	++	-	-
BILBAO	E1	++	++	++	*
	E2A	+	-	+	-
	E2B	++	++	++	++
	E3	+++	++	-	-
SEVILLA	E1	+	-	-	-
	E2A	+	+	++	++
	E2B	+++	++	++	++
	E3	+++	++	-	-

*Este escenario, a priori, parece adecuado. Al comparar los resultados con Madrid y Sevilla, las soluciones son cuestionables.

6.5. Conclusiones generales

En el trabajo de investigación realizado se ha observado que, al ampliar el espectro de evaluación a todas las etapas del ciclo de vida, puede variar la pertinencia de las soluciones que, a priori, parecían recomendables. Esto conduce a formular una primera premisa con rotundidad: es necesario aplicar el Ciclo de Vida a la toma de decisiones.

El óptimo desde el punto de vista energético se ha comprobado que está muy ligado al óptimo desde la óptica ambiental, puesto que se trata de un elemento determinante en el comportamiento ambiental global. No obstante, como ha quedado reflejado en los casos de estudio, la evaluación no debe abordar únicamente el comportamiento energético, ya que se observan variaciones en el comportamiento ambiental que reflejan la influencia de los materiales empleados en rehabilitación. Por ejemplo, en el escenario E1, la mejora energética en Bilbao es superior a la de Madrid, pero el análisis comparativo evidencia que los ahorros ambientales de ciclo de vida resultan similares, siendo mayor el impacto ambiental inicial en Bilbao.

La aplicación del criterio ambiental o económico puede conducir a seleccionar soluciones diferentes. La integración de ambos criterios resulta necesaria, contemplando las singularidades del ámbito específico de la toma de decisiones:

- Inversión privada: la inversión inicial puede ser un criterio de corte, que lleve a elegir unas determinadas estrategias por debajo de un coste inicial máximo admisible.
- Política pública: las subvenciones deberían tener como objetivo prioritario la minimización del impacto ambiental. El criterio de mínima inversión y de optimización de costes no constituye un criterio adecuado para ser directamente aplicado en el ámbito de política pública. Un procedimiento congruente con la toma de decisiones en este ámbito pasa por la definición de criterios de ponderación de las dimensiones ambiental y económica, que incorpore la visión de todos los *stakeholders* y posibilite la operatividad de integrar estas visiones en la definición de las pautas y estrategias de subvenciones públicas a la rehabilitación, aplicando la metodología desarrollada.

El trabajo de investigación realizado confirma la hipótesis de partida, constatando que las **medidas de rehabilitación energética** que se están aplicando **actualmente** en el contexto edificatorio español **son cuestionables**, si se incorpora el punto de vista **ambiental y económico**, desde la **perspectiva de Ciclo de Vida**.

Se ha alcanzado el objetivo principal establecido en la presente investigación, de desarrollar una **metodología multicriterio** para el **análisis comparativo** de la eficiencia de las **estrategias actuales de rehabilitación**, combinando la evaluación **del comportamiento energético, ambiental y económico** mediante el **Enfoque de Ciclo de Vida**.

6.6. Futuras líneas de investigación

La presente investigación supone un punto y aparte en el desarrollo de las metodologías de evaluación de la sostenibilidad aplicadas a la rehabilitación, abriendo nuevos caminos de investigación. Estas vías de recomendable futura exploración se resumen brevemente a continuación:

1. Evaluación de un mayor espectro de soluciones constructivas, materiales, espesores de aislamiento, tipologías edificatorias, etc.

En el desarrollo de esta investigación se han encontrado algunas limitaciones que será importante tener en consideración en los desarrollos futuros. Por un lado, una limitación impuesta desde el principio en la definición de las soluciones de rehabilitación, ha sido que se ha evaluado una única solución por escenario, partiendo de las estrategias de rehabilitación actuales. Esto se ha realizado con el fin de poder acotar el estudio para poder desarrollar y describir adecuadamente la metodología de evaluación y comprobar la hipótesis. Sin embargo, la metodología desarrollada tiene un gran potencial para la optimización de las soluciones de rehabilitación, si se considera un espectro más amplio de soluciones constructivas, materiales, espesores de aislamiento, etc. Además su evaluación se podría extender a otras tipologías edificatorias. Esta labor comenzó a desarrollarse de manera puntual durante la estancia realizada en la universidad KU Leuven, en la que, viendo que para el caso de estudio de Madrid sólo resultaba óptimo el escenario E2B, se analizaron otros escenarios posibles, manteniendo similares soluciones constructivas y aumentando el espesor de aislamiento (Pombo et al., 2016).

2. Aplicación de la metodología en un edificio real.

Una limitación adicional importante es el modelo de edificio empleado. Se ha trabajado con un edificio tipo, no real, definido para Madrid, Bilbao y Sevilla. Esta decisión se adoptó porque presentaba la ventaja de poder comparar los resultados de las ciudades analizadas, controlando al menos un parámetro común, el edificio rehabilitado. Varios autores destacan la importancia del comportamiento del usuario en los resultados energéticos (Guerra Santin et al., 2009; Guerra-Santin y Itard, 2010; Mullaly, 1998; Owens y Wilhite, 1988; Seligman et al., 1978; Steg, 2008). En este caso, al no tratarse de un edificio real, no se ha podido ajustar el perfil de uso a la realidad, ni se ha podido ajustar el modelo de simulación con el comportamiento del edificio real. Por ello, resulta conveniente realizar la evaluación de las estrategias de rehabilitación sobre demostradores reales, pudiendo ajustar más adecuadamente los parámetros de entrada del edificio de estudio.

3. Armonización de los criterios de valoración para llegar a un valor único ambiental.

En relación a la metodología desarrollada, la falta de armonización y la inexistencia de métodos de agregación transparentes, han llevado a elegir un método de valoración monetaria, que integra de forma holística y transparente las categorías de impacto ambiental definidas por los estándares europeos (UNE-EN 15978, 2012; UNE-EN 15643-1, 2012). Sin embargo, y dado el debate científico en torno a la pertinencia de la monetización de los impactos ambientales, se considera de gran interés el seguir profundizando en la armonización de los criterios de valoración. En este sentido, se identifican dos líneas prioritarias de trabajo:

- El cuestionamiento sobre la valoración monetaria como la mejor aproximación para la armonización.
- Dado que los criterios metodológicos que actualmente se están desarrollando en el contexto europeo apuntan en la dirección de la valoración monetaria, es necesario profundizar en la determinación de los valores de monetización específicos para el contexto español.

4. Integración del Análisis de Ciclo de Vida Social (ACVS) en la metodología de evaluación.

En la metodología propuesta no se ha incluido el ámbito social, tercer pilar de la sostenibilidad. Esta decisión se adoptó considerando su escaso desarrollo y su inexistente aplicación en la evaluación de la rehabilitación residencial. El Análisis Social de Ciclo de Vida (ASCV) en sí mismo requiere para su desarrollo una tesis doctoral; prueba de ello son las dos tesis doctorales que abordan esta temática, una de ellas recién leída y otra actualmente en desarrollo, en el Programa de Doctorado de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la UPM. En un futuro, cuando el avance metodológico en ASCV haga posible su aplicación en la evaluación, se recomienda la integración de la dimensión social en la metodología multicriterio.

5. Desarrollo de una herramienta informática que permita a la inversión privada analizar y seleccionar las soluciones de rehabilitación más adecuadas

El desarrollo de una herramienta informática permitiría a arquitectos y proyectistas identificar y seleccionar las soluciones de rehabilitación más adecuadas en cada caso. En este sentido, cabe destacar que desde el grupo de investigación ABIO, al que pertenece la doctoranda, ya se ha comenzado a preparar propuestas en esta línea, presentando el pasado julio la propuesta de proyecto HERREH (HERramienta de evaluación de la sostenibilidad para la determinación de las estrategias óptimas de

REHabilitación de viviendas) a la convocatoria Retos-Investigación 2015, junto con las Universidades de Sevilla, País Vasco y Lovaina (KU Leuven), Bélgica.

6. Desarrollo de una herramienta que permita a las administraciones públicas establecer criterios para la concesión de ayudas a la rehabilitación.

Tal y como se ha insistido a lo largo del trabajo de investigación, una vez se ha caracterizado la variable ambiental y las implicaciones en términos de coste, es necesaria la integración de ambos criterios. El desarrollo de una herramienta informática posibilita, desde el punto de vista operativo, aplicar diferentes criterios de ponderación/priorización para la concesión de subvenciones públicas, como por ejemplo, la importancia relativa de disminución de ciertos impactos ambientales o la inversión pública que se recomienda sea abordada para alcanzar una reducción de impacto ambiental determinada.

6.7. Difusión de resultados

La producción científica ha ido de la mano del desarrollo de la investigación, ya desde el estado de la cuestión y la revisión crítica de las metodologías de evaluación. Esto ha permitido tener desde el comienzo una continua retroalimentación de revisores internacionales, que han cuestionado y revisado el trabajo realizado, generando una reflexión continua sobre el desarrollo de la investigación y las decisiones tomadas en cada momento.

6.7.1. Publicaciones en revistas

- **POMBO, O.**, RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, vol. 123, pp. 88-100. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.137>. **(JCR, IF= 2.884, Q1)**.
- **POMBO, O.**, ALLACKER, K., RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. Sustainability assessment of energy saving measures: a multi-criteria approach for residential buildings retrofitting—A case study of the Spanish housing stock. *Energy and Buildings*, vol. 16, no. 5, pp. 710-721. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.01.019. **(JCR, IF= 3.884, Q1)**.
- BARBERO-BARRERA, M. M., **POMBO, O.** y NAVACERRADA, M. A., 2016, Textile fibre waste bindered with natural hydraulic lime. *Composites Part B: Engineering*, vol. 94, pp. 26-33. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.03.013. **(JCR, IF= 2.983, Q1)**.
- **POMBO, O.**, NEILA, y J. RIVELA, B., 2015. Viviendas de postguerra en España. La rehabilitación como herramienta para una arquitectura más sostenible. *Ambitat 14, Propuestas de arquitectura bioclimática*.

6.7.2. Publicaciones en congresos y seminarios

- **POMBO, O.**, RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. An assessment methodology for the energy, environmental and economic evaluation of housing renovation strategies. *YRSB16 Prague*.
- **POMBO, O.**, ALLACKER, K., RIVELA, B. y NEILA, J., 2016. A multi-criteria approach for the assessment of housing renovation strategies. *Sustainable Built Environment (SBE) regional conference*, Zurich.

- **POMBO, O.**, 2015. Multi-criteria assessment of housing retrofitting solutions through the life cycle approach. Methodological proposal. *Architectural Engineering Research Seminar*, Departamento de Arquitectura, Universidad Católica de Lovaina, KU Leuven, Lovaina, 10 marzo 2015.
- **POMBO, O.**, ALLACKER, K., RIVELA, B. y NEILA, J., 2015. Multi-criteria assessment of housing retrofitting solutions through the life cycle approach. A case study in Madrid. Presentación oral en *DS²BE*, Bruselas, 20-30 abril 2015.
- **POMBO, O.**, RIVELA, B. y NEILA, J., 2014. Is building renovation truly sustainable? The need for applying a multi-criteria assessment through life cycle approach. *World SB14 Barcelona*. Barcelona, pp. 16-22. ISBN 978-84-697-1815-5.
- **POMBO, O.**, RIVELA, B. y NEILA, J., 2014. Modelo de edificación para el análisis multicriterio de la rehabilitación del parque residencial madrileño de los años 1950-1980. *Constec*. Madrid, pp. 412-416. ISBN 978-84-617-0504-7.
- **POMBO, O.**, GARCÍA-ERVITI, F., RIVELA, B. y NEILA, J., 2014. Energy and economic survey of the renovation of a residential building wall in Madrid. *5th European conference on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Planning (EESAP)*. San Sebastián, pp. 187-194. ISBN: 978-84-9082-003-2.

English summary

Multi-criteria assessment of housing
retrofitting solutions through the Life
Cycle Approach

Methodological proposal

Chapter 1: Introduction

1.1. Background

The building sector is well known to be one of the key energy consumers worldwide. In Europe, buildings are responsible for 40% of final energy consumption and 36% of CO₂ emissions (Cuchí y Sweatman, 2012a). The renovation of existing buildings provides excellent opportunities for reducing energy consumption and greenhouse gas emissions. The majority of the current European residential building stock was built during 1940-1970s, with low standard especially with regard to energy performance (Häkkinen, 2012). In Spain, 54% of the housing stock was built before 1980, i.e. before the first regulation concerning energy efficiency in buildings (National Housing Institute, 2014). This large stock is a consequence of the high housing need in the middle of the last century, in a context with a low industrial production and without any comfort standards. Improving these buildings with a low energy performance is hence an urgent and important challenge.

Many authors have emphasized the importance of building renovation in energy savings and reduction in greenhouse gas emissions (Nemry et al., 2010; Dall'O' et al., 2012b; Ahern et al., 2013; Mata et al., 2013; Cuchí y Pagès, 2007; Cuchí y Sweatman, 2011a, 2012a). The improvement of the efficiency of the existing building stock is the only source of CO₂ emissions reduction, as the energy efficiency of new buildings only contributes on curbing the increase of the emissions, but not reducing them. Moreover, in any future emissions scenario –and, especially before the efficient energy generation alternatives take on greater importance– the efficiency is the key strategy combating climate change (Cuchí and Pagès, 2007).

Nowadays, in Spain there are 3.5 millions of unoccupied dwellings (Instituto Nacional de Estadística, 2013). Moreover, for the first time in a century and a half, the demand for new housing is not set to increase in the long term (Cuchí y Sweatman, 2011a). Therefore, sustainable housing renovation is an urgent and important challenge. The improvement of the energy efficiency should be the focus of the Spanish building sector in order to save energy, improve the quality of life of the dwellings and meet the European objectives, in terms of energy savings and CO₂ emissions reduction.

The accession to the Kyoto Protocol has led the European Union to adopt important measures in order to comply with its commitments to reduce, by 2020, overall greenhouse gas emissions (20% below 1990 levels), and energy consumption (20%) and to promote the use of renewable energies (20%). Thus, following the adoption of the

Directive 2002/91/EC, repealed by Directive 2010/31/EU (EPBD), public administrations have started to take measures in order to implement it.

At national context, the Ministry of Works formulated the “State Housing and Renovation Plan 2009-2012” and the activities contained in the Spanish Energy Saving and Efficiency Plan 2008-2012 (PAEE+). This resulted in the publication of renovation guides by the regions, such as the “Housing energy efficient renovation guide” published by the Region of Madrid in 2008 or the “Building and Sustainable Renovation guide in the Basque Country”, reviewed in 2011. Moreover, some regions published their strategies for the Horizon 2020. In Cataluña, “A strategic Plan of Energy and Climate Change 2020” was formulated. In the same vein, the Basque Country developed “A Roadmap for a Sustainable Building Sector of the Basque Country, Bultzatu 2025”.

The 1st of June of 2013, Royal Decree 235/2013, which adopted the basic procedure for energy certification of existing buildings, was adopted. Together with the Law on Renovation, Regeneration and Urban Renewal, aimed to encourage and raise awareness in society of the need to improve the existing building stock, in terms of energy efficiency and CO₂ emissions. Recently, the program PAREER-CRECE has been approved in order to boost and promote retrofitting activities encouraging energy savings, improvement of the energy efficiency, use of renewable energies and CO₂ emissions reduction in existing buildings, as well as to contribute to the achievement of the objectives established in the Directive 2010/27/EU and the Action Plan 2014-2020. The actions eligible for support must improve the energy rating of the building one letter, compared with the initial rating of the building.

All these initiatives consider just the energy savings and CO₂ emissions reduction during the use phase. After retrofitting a building, the energy use decreases, but this is accompanied by an increase in use of materials, which increases the demands on production energy. Therefore, the embodied energy of building materials increases, and the energy use in the operation phase is comparable to those of other phases (Ardente et al., 2011). Moreover, even if the climate change is a major challenge, a broader range of environmental impacts should be analyzed.

At the time, economic assessment of housing renovation solutions is focused mainly on the investment cost and energy savings. Nevertheless, other costs of the life cycle, such as, maintenance and replacement costs, are not considered. Depending on the measure, the renovation can be non profitable if this is considered. All in all, in Spain, the whole life cycle of the building (Figure 1.1) is not taken into account.

Figure 1.1. Life cycle phases of the building. Source: author.

1.2. Hypothesis

The hypothesis of the present research is that **retrofitting solutions** currently applied in the **Spanish building context** might be **challenged**, if **environmental** and **economic** perspective, through the Life Cycle Approach is considered.

1.3. Objectives

1.3.1. Main objective

The main objective of the research is the development of a **multi-criteria methodology** for the **comparative analysis** of the **retrofitting solutions**, combining **environmental** and **economic assessment** through the **Life Cycle Approach**.

1.3.2. Specific objectives

In addition to the primary objective, the following specific objectives are defined:

Objective 1

Critical review of the research undertaken on housing retrofits, to provide an overview and identify the state of the art of renovation solutions and assessment methodologies, drawing conclusions and the shortcomings to correct.

Objective 2

Methodological proposal for the energy, environmental and economic **assessment** of the housing **retrofitting solutions**, through the **Life Cycle Approach**.

Objective 3

Characterization of the **current renovation solutions** in different locations with divergent climates, within the most **representative housing stock** with renovation needs in the short term.

Objective 4

Assessment of the current renovation measures, through case studies, to determine if these actions represent a real improvement and if the policies are appropriate.

1.4. Research methodology

The methodology outlined in the present research has been developed in four steps, which are consistent with the specific objectives and the content of this document (Figure 1.2).

Figure 1.2. Scheme of the proposed methodology. Source: author.

As a first step in the development of the multi-criteria methodology, an overview of existing housing renovation studies is provided in order to know how sustainability is assessed, by focusing on the state of the art of retrofitting residential buildings (chapter 2).

Based on the state of the art, a critical review of the assessment methodologies has been performed, in order to establish the methodological basis and assumptions that are already subject of consensus in the scientific community. On the basis of the findings reported, the assessment methodology for the energy, environmental and economic evaluation of housing renovation strategies has been proposed. This work can be found in chapter 3.

As the present research seeks to identify if the current retrofitting solutions are efficient if the life cycle assessment and life cycle cost are included, a representative building model with renovation needs in the short term has been defined, selecting three cities with different climates: Madrid, Bilbao and Seville. Moreover, retrofitting scenarios have been proposed (chapter 4).

The methodology developed in chapter 3 is exemplified by the three case studies previously defined (chapter 4), getting the multi-criteria assessment of the energy saving measures in Madrid, Bilbao and Seville, identifying the most preferred solutions in each case (chapter 5).

Finally, chapter 6 reflects the general and partial conclusions achieved along the research. Moreover, future work is presented, as well as the dissemination of the results, which, as it can be observed in the beginning of each chapter, has been carried out in parallel of the research progress. This has enabled to get feedback from international reviewers that have contributed to the improvement of the work.

Chapter 6: Conclusions and future Outlook

6.1. Conclusions of the critical review of the evaluation methods

In order to identify the state of the art and the methodological needs of the application of Life Cycle Approach to housing renovation, a critical review of the research undertaken on this topic has been conducted. In the light of the reviewed works, it is confirmed that even though there is certain consensus with respect to the criteria for the selection of energy efficiency measures, the assessment criteria differ broadly and widely. Some authors consider solely environmental aspects, others analyze exclusively economic factors, while social issues are still put aside.

The analyzed research works evidence the priority need of methodological harmonization, considering the Life Cycle Approach in order to enable the optimization of retrofitting solutions, as well as the evaluation of the real improvement potential of housing renovation. After retrofitting a building, the energy use decreases, but this is accompanied by an increase in use of materials, which increases the demands on production energy. Therefore, the embodied energy of building materials increases, and the energy use in the operation phase is comparable to those of other phases (Ardente et al., 2011; Chen et al., 2001). This is well seen in some results of the present research, such as the case study of Seville, where the scenario E3 revealed that the renovation phase had a great influence (34%) on the total environmental cost. This percentage is quite relevant, as this impact occurs in the year zero, while the remaining 66% takes place along the remaining lifespan of the building, which is 50 years.

On the other hand, a multiplicity of individual impact score is rarely a good basis for decision-making. The fragmented environmental impacts not only make the environmental assessment more difficult, but also hinder the possibility of combining these with financial indicators. However, the different normalization and weighting methods reduce the transparency of the study, and make the results uncertain and subjective. Moreover, results cannot be compared (Pombo et al., 2014).

In short, this analysis identified:

- the need of the methodological harmonization;
- the methodological basis as well as the main assumptions accepted by the scientific community, in order to be integrated in the methodology proposed for the environmental and economic assessment of the renovation strategies:

lifespan, system boundaries, environmental and economic indicators, calculation methods, sensitivity analysis and the optimization methods of the environmental and economic indicators.

6.2. Conclusions of the methodology proposed for the assessment of retrofitting solutions

The analysis of the current situation reveals the need to adapt to an increasingly stringent scenario, in terms of energy efficiency of buildings, where the construction phase is, consequently, becoming gradually more important. In this context, it is obvious that assessing building renovation only from the energy consumption perspective is not enough: considering Life Cycle Approach is thus necessary to estimate the real improvement potential of the renovation of the existing building stock.

The developed work has focused on the energy, environmental and economic assessment of the housing renovation, with the aim of proposing an evaluation methodology, which integrates these three criteria through the Life Cycle Approach. The methodology is illustrated, in chapter 5, by three case studies. Four retrofitting scenarios have been analyzed, in a representative residential building model, from the Spanish housing stock, located in three cities with different climates. It might be concluded that the proposed methodology allows the application of Life Cycle Approach, by the integration of environmental and economic variables.

The proposal integrates the methodological basis as well as the main assumptions accepted both at the scientific community and at the policy level. The high potential of the current research lies in the methodological proposal, which is an essential tool to address the need for a definition of the relevant public policy criteria, through a holistic approach. The application of this method enables to define the selection criteria, to determine which actions should be subsidized, as well as the amount of the funding, in order to be a feasible renovation for the user, because as it was observed in the case studies, the payback periods are long (in the cases analyzed, it varies between 14 and 37 years).

According to the combination of Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost (LCC), Pareto optimization method is considered adequate for the multi-criteria optimization. In the current research, this method has enabled the selection of the preferred strategies from the environmental and economic approach, looking for those with minimum investment cost and maximum life cycle savings.

It is noted, by the exemplification of the proposed methodology, that there is a need to express the environmental results as a single score, in order to facilitate the decision-making. However, as it was concluded by Rivela in her Doctoral dissertation, there is not a scientific method to get a single score in which human priorities –such as the possible disease of cancer– and the degradation of the ecosystem are merged: the conflict of

valuation which needs to be addressed to achieve a final score, has to be solved within the weighting and prioritization field, which is a subjective procedure (Rivela, 2012). In this regard, the adopted monetary valuation method is considered suitable, as it allows a holistic and transparent weighting. Furthermore, environmental costs can be compared/added up with/to the financial costs, which offers significant added value compared with other weighting methods (Pombo et al., 2016). In the present research, environmental and financial results are assessed separately, as they are key parameters on the decision-making. Nevertheless, a further scientific discussion about the harmonization of the weighting and valuation methods, as well as the specific monetary values for each context is needed. It is worth stressing that the multi-criteria assessment methodology proposed within this research, can be easily adapted by integrating the future scientific development in these research areas.

Additionally, the review reflected that Life Cycle methodologies present certain uncertainties, mainly due to the large evaluation period. Results highlighted that economic parameters were the ones that more uncertainty present. If the lifespan or the growth of energy price was lower, some scenarios were no longer suitable. This happened also when the discount rate was higher. Contrarily, the variation of the lifespan or the monetary values did not change the trend of the environmental results.

The access to representative and reliable data is another key feature on the inherent uncertainty of the LCA application, and consequently, on the results. Despite years of efforts to develop databases adapted to the Spanish context, a sufficiently wide range of data related to the construction materials do not yet exist. In this regard, promising initiatives, such as OpenDAP database, within the framework of the pilot project “inData”, are expected to contribute to reduce the uncertainty of the results achieved in the implementation of the methodology proposed, throughout the access to representative and reliable data of the Spanish context.

6.3. Conclusions of the current housing renovation

The research carried out on the current housing renovation reveals that, in Spain, energy efficient housing renovation has been conducted mainly due to the financial incentives. In Madrid, for example, almost the half of the renovations came from unfavorable Technical Building Inspections (TIB), which required the improvement of certain elements of the building envelope. They took advantage of existing financial incentives, to add insulation in the elements they had to improve. These subsidies have been managed by the regional communities, with different requirements and rates.

In Madrid and Seville, the requirements for the granting of the aid have been low. A deep renovation was not required and only the improvement of the thermal transmittance of the renovated elements was valued. Therefore, deep renovation is unusual, which is a missed opportunity in the improvement of the energy efficiency of the housing stock. In Bilbao, the requirements to get the subsidies were higher, as it was necessary to achieve a "C" in the Building Energy Efficiency Certification, as well as to monitor the dwellings after the renovation. Consequently, deep renovation is more often carried out.

As far as renovation measures are concerned, there is a low variety. The same solution is applied for the renovation of the roof in Madrid, Bilbao and Seville, with a difference in the thickness of insulation material, which is higher in Madrid. Identical windows are placed in Madrid and Seville, although the climates are completely different, especially in winter. Furthermore, sun protections are not considered. The measures for the retrofitting of the façade are completely different in each city. However, there is not variety in each location.

To sum up, throughout this analysis, the main retrofitting solutions implemented in Madrid, Bilbao and Seville have been identified, demonstrating the lack of reflection around housing renovation, as well as the inadequate approach of the subsidies.

6.4. Conclusions of the retrofitting scenarios

The case studies presented in chapter 5 show the feasibility of the application of the current methodology for the assessment of retrofitting solutions. On the one hand, the methodological implications and the implementation basic characteristics are tackled. On the other hand, the results achieved contribute to the debate on the adequacy of the current renovation practices and policies that have been analyzed in Madrid, Bilbao and Seville.

As far as the comparative analysis of the case studies is concerned, the energy vector is crucial for the financial cost and has a significant impact on the primary life cycle energy consumption, while the influence on the environmental impact is lower. Since in the present research the energy vector is the same in each city, this has not had a significant repercussion in the assessment of each city separately. The contribution of the material in the environmental dimension varies between 3% and 34% of the global environmental impact.

The main conclusions of each scenario, for the type of building analyzed in Madrid, Bilbao and Seville, are presented below. Although the conclusions cannot be generally transferable to the whole housing stock, it should be pointed out the effort made in the selection of the case studies, looking for a certain representativeness of the context evaluated.

Business as usual solutions (E1)

Results showed that in Madrid and Seville business as usual solutions does not seem suitable from the environmental and economic perspective. In the reviewed renovated buildings, it is discovered that the retrofitting actions are directly related to the granting of aids and the public policy requirement for this granting. Results show that solutions, from a global perspective, seem inadequate among the scenarios under consideration; it is note that for similar life cycle savings, there are other scenarios with lower environmental and financial initial cost (i.e. scenario E2A in Seville), or scenarios that achieve higher savings with a low additional investment cost (i.e. scenario E2B in Madrid).

In Bilbao, contrarily, demands were higher, resulting in suitable renovation actions. However, if the results are compared with Madrid and Seville (Figure 6.1), Bilbao is always on the right side of the graph, which implies a higher initial environmental and financial cost. These findings reveal that the solutions applied in Bilbao, particularly the use of ventilated façade, are not as suitable as it was expected.

The high initial costs calls into question the solutions applied in Bilbao, especially façade solutions. The implementation of ventilated façade in Bilbao could be justified by the rainy and humid climate. However, the ground for their choice reflected in the project report, is that this solution provides to the architect more flexibility to define and renovate the image of the building.

Figure 6.1. Initial Environmental cost (IE) vs. Life cycle Environmental savings (LE savings) (left); Initial Financial cost (IF) vs. Life cycle Financial savings (LF savings) (center); Initial Financial cost (IF) vs. Life cycle Environmental savings (LE savings) (right) of the retrofitting solutions of scenario E1, in Madrid, Bilbao and Seville. Source: author.

Summarizing, in the light of the results obtained, for the building analyzed, it may be argued that the current renovation solutions in Madrid, Bilbao and Seville, do not seem suitable from the environmental and economic perspective.

Spanish Building Regulation (CTE DB HE)-renovation (E2A)

The strategies proposed within this scenario in Madrid and Bilbao do not seem suitable from the environmental and economic approach. The reason is, once again, due to the low requirement of the CTE.

In the case of Madrid (Figure 6.2), the additional investment needed for a higher insulation level of the building envelope (i.e. scenario E2B compared to E2A) is not so high (9%), while it leads to important extra environmental and financial savings (i.e. 24% and 43% respectively).

Figure 6.2. Relation between Initial Financial cost (IF) and the Life cycle Environmental (LE) and Financial (LF) savings, between scenarios E2A and E2B in Madrid. Source: author.

Likewise, in Bilbao (Figure 6.3), the additional investment needed for a higher insulation level of the building envelope (i.e. scenario E2B compared to E2A), is not so high (11%), while it leads to important extra environmental and financial savings (i.e. 56% and 150% respectively).

Figure 6.3. Relation between Initial Financial cost (IF) and the Life cycle Environmental (LE) and Financial (LF) savings, between scenarios E2A and E2B in Bilbao. Source: author.

In Seville, however, energy saving measures seem suitable. Because of the low requirements of the CTE, as well as the mild winter, the windows located in the south façade, which represent the 41%, are not replaced. Thus, the renovation is cheaper, and the initial environmental cost decreases. Therefore, the additional investment needed for a higher insulation level of the building envelope (i.e. scenario E2B compared to E2A) is

quite similar (51%) to the extra environmental and financial savings (i.e. 48% and 47% respectively) (Figure 6.4).

Figure 6.4. Relation between Initial Financial cost (IF) and the Life cycle Environmental (LE) and Financial (LF) savings, between scenarios E2A and E2B in Seville. Source: author.

In short, the results show that, for the type of building analyzed, this scenario seems inadequate in Bilbao and Madrid, cities with medium-high climate severity respectively, due to the low requirements of the CTE. On the other hand, these low demands allow for reducing the initial environmental and financial cost in Seville, which has a low climate severity in winter, turning out to be a suitable scenario.

Spanish Building Regulation (CTE DB HE)-new buildings (E2B)

This is the only scenario that seems to be adequate for Madrid, Bilbao and Seville. This, in the case of Madrid and Seville, is due to the higher requirements than the previous scenario (scenario (E2A)). The additional investment cost is not so high, leading to higher extra environmental and financial savings, as it is explained in the previous scenario. In Seville, it is observed that the previous scenario (scenario E2A) was adequate, remaining this trend in this scenario, where a higher investment cost leads to higher life cycle environmental and financial savings.

Standard Passivhaus (E3)

This scenario is discarded in Madrid, Bilbao y Seville. The additional investment cost and the maintenance and replacement costs of the equipment make this scenario not feasible (Figure 6.5) from the financial perspective. It can be concluded therefore, that the increase in demand does not necessary imply an improvement.

Figure 6.5. Initial environmental cost (IE) vs. life cycle environmental savings (LE savings) (left), initial financial cost (IF) vs. life cycle financial savings (LF savings) (center) y initial financial cost (IF) vs. life cycle environmental savings (LE savings) (right) of the retrofitting solutions of scenario E1, in Madrid, Bilbao and Seville. Source: author.

As final conclusion, Table 6.1 summarizes the adequacy of the evaluated renovation solutions, for the type of building analyzed in Madrid, Bilbao and Seville, from the energy, environmental and financial dimensions, as well as the results of the multi-criteria assessment. The adequacy is reflected in the + to +++ scores, while the non recommended solutions are expressed by - score.

Table 6.1. Summary of the adequacy level of the retrofitting solutions assessed in the renovation scenarios proposed, in Madrid, Bilbao and Seville.

		Energy assessment	Environmental assessment	Financial assessment	Multi-criteria assessment
MADRID	E1	+	-	-	-
	E2A	+	-	-	-
	E2B	++	++	++	++
	E3	+++	++	-	-
BILBAO	E1	++	++	++	*
	E2A	+	-	+	-
	E2B	++	++	++	++
	E3	+++	++	-	-
SEVILLE	E1	+	-	-	-
	E2A	+	+	++	++
	E2B	+++	++	++	++
	E3	+++	++	-	-

*This scenario seems to be suitable. However, when it is compared with Madrid and Seville, solutions are questioned.

6.5. General conclusions

In the present research it is observed that, when the spectrum of the assessment life cycle phases is extended, the adequacy of the solutions that initially seemed suitable, can vary. This leads to formulate strongly the first statement: Life Cycle Approach must be considered in the decision-making.

The optimal solution from the energy perspective has been proved to be directly related to the optimal one, from the environmental point of view. However, as it has been reflected in the case studies, the assessment cannot just address energy performance, as there are variations in the environmental performance, which reflect the influence of the materials used in the renovation. For example, in the scenario E1, the energy improvement of Bilbao is higher than the improvement of Madrid, but the comparative analysis reveal that the environmental life cycle savings are quite similar, while the initial environmental impact in Bilbao is higher.

The environmental or economic approach can lead to select different solutions. The integration of both criteria becomes necessary, considering the singularities of the specific field of the decision-making:

- Private investment: initial investment can be a cutoff criterion, to choose certain strategies under a maximum eligible investment cost.
- Public policy: the main objective of the subsidies should be minimizing the environmental impact. The criterion of minimum investment cost and optimization of costs cannot be taken as a criterion for be directly applied in the public policy. A consistent procedure within the decision-making in this field may be achieved by defining the weighting criteria of the environmental and economic dimensions that incorporate the vision of all the stakeholders, allowing the capacity to integrate these perspectives in the definition of the guidelines and strategies of the public subsidies for renovation, using the methodology developed.

The present research has demonstrated the hypothesis, noting that the **current retrofitting solutions** applied in the Spanish building context **are questionable**, if the **environmental and economic Life Cycle Approach** is considered.

The main objective of the present research, which is the development of a **multi-criteria methodology** for the **comparative analysis** of the **retrofitting solutions, combining environmental and economic assessment** through the **Life Cycle Approach**, has been reached.

6.6. Further research

The current research breaks new ground on the development of sustainability assessment methods for housing retrofitting. Further research is suggested below:

1. Assessment of a wider range of building solutions, materials, insulation thickness, building typologies, etc.

Some constraints found in the current research should be considered in further research. On the one hand, retrofitting strategies were limited from the beginning, evaluating one solution by scenario, based on the business as usual strategies, in order to develop adequately the assessment method and demonstrate the hypothesis. However, this method has a great potential for the optimization of renovation measures, if a wider range of building solutions, materials, insulation thickness, etc. are considered. Moreover, the evaluation should be extended to other typologies. This work started promptly during the PhD internship in KU Leuven University, where it was found that the suitable scenario in the case study of Madrid was only the scenario E2B. Therefore new scenarios were proposed, keeping similar solutions, but increasing the thickness of the insulation materials (Pombo et al., 2016).

2. Evaluation of a real building.

The building model is also an important constraint. The study has been conducted analyzing a building type, defined for Madrid, Bilbao and Seville. The decision was taken because it has the advantage of allowing the comparison of the evaluated cities by controlling at least a common parameter, the renovated building. However, the relevance of the user's behavior on the energy consumption is highlighted in the existing literature (Guerra Santin et al., 2009; Guerra-Santin y Itard, 2010; Mullaly, 1998; Owens y Wilhite, 1988; Seligman et al., 1978; Steg, 2008). In this case, as it was not a real building, the usage profile was not possible to adjust to the reality, neither the results from the simulation model with the real performance of the building.

3. Harmonization of the valuation criteria to achieve a single score.

As far as the multi-criteria assessment method is concerned, a monetary valuation method that integrates in a holistic and transparent manner the environmental impact indicators recommended by the European standards (EN 15978:2011, 2012; EN 15643-2, 2011), was chosen due to the lack of harmonization and transparent weighting methods. Nevertheless, more research is needed for the application of harmonized and transparent aggregation methods. In this regard, two main working lines are identified: The inquiry of the monetary valuation as the best harmonization approach.

As the criteria that are currently under development in the European context are heading the direction of the monetary valuation, it is necessary to deepen on the determination of the monetary values for the Spanish context.

4. Integration of Social Life Cycle Assessment (SLCA) in the assessment methodology.

Social dimension, third pillar of sustainability, has not been included in this methodology. This decision was taken because of the limited development and the shortage application in housing renovation. The topic itself can be considered for a PhD research, and proof of this is that there are two works in the Department of Construction and Technology in Architecture (DCTA) covering this issue. Further research is required in order to define the methodology and the impacts of this pillar, as well as to incorporate it into Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). This would represent a significant step forward in meeting the strong need for an integrated methodology that takes into account environmental, economic, and social impacts from a Life Cycle perspective.

5. Development of a software for the selection of the most preferred renovation solutions, for the private investment.

The development of a software tool would enable architects and designers, to identify and select the most preferred retrofitting solutions in each case, considering the environmental and economic assessment from the Life Cycle Approach. In this sense, ABIO research group, where the research has been conducted, is preparing proposals on this topic. The last July the proposal of the project HERREH (Sustainability assessment tool for the optimal selection of housing retrofitting solutions) was submitted on the *Retos-Investigación 2015* call, along with the University of Seville, The University of Basque Country and KU Leuven, Belgium.

6. Development of a tool for public administrations to establish the criteria for the granting of the aids for housing renovation.

As repeatedly underscored in the research, once the environmental variable and the financial implications have been characterized, it is necessary to integrate both criteria. The development of a software tool enables, from an operation point of view, to apply different weighting/prioritizing criteria for the granting of public subsidies, such as, the relative importance of reducing certain environmental impacts or the public investment that should be addressed to reach a particular reduction of the environmental impact.

6.7. Dissemination of results

Scientific production has gone hand in hand with the development of the research, from the beginning, providing feedback of international referees, which have questioned and reviewed the work, leading to a continuous reflection about the development of the research and the decisions taken in each step.

6.7.1. Journals

POMBO, O., RIVELA, B. and NEILA, J., 2015. The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook. *Journal of Cleaner Production*, DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.137>. (JCR, IF= 2.884, Q1).

POMBO, O., ALLACKER, K., RIVELA, B. and NEILA, J., 2016. Sustainability assessment of energy saving measures: a multi-criteria approach for residential buildings retrofitting—A case study of the Spanish housing stock. *Energy and Buildings*, vol. 16, no. 5, pp. 710-721 DOI 10.1016/j.enbuild.2016.01.019. (JCR, IF= 3.884, Q1).

BARBERO-BARRERA, M. M., **POMBO, O.** and NAVACERRADA, M. A., 2016, Textile fibre waste bindered with natural hydraulic lime. *Composites Part B: Engineering*, vol. 94, pp. 26-33. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.03.013. (JCR, IF= 2.983, Q1).

POMBO, O., NEILA, and J. RIVELA, B., 2015. Viviendas de postguerra en España. La rehabilitación como herramienta para una arquitectura más sostenible. *Ambitat 14, Propuestas de arquitectura bioclimática*.

6.7.2. International conferences and seminars

POMBO, O., RIVELA, B. and NEILA, J., 2016. An assessment methodology for the energy, environmental and economic evaluation of housing renovation strategies. *YRSB16 Prague*.

POMBO, O., ALLACKER, K., RIVELA, B. and NEILA, J., 2016. A multi-criteria approach for the assessment of housing renovation strategies. *Sustainable Built Environment (SBE) regional conference*, Zurich.

POMBO, O., 2015. Multi-criteria assessment of housing retrofitting solutions through the Life Cycle Approach. Methodological proposal. *Architectural Engineering Research Seminar*, Departamento de Arquitectura, Universidad Católica de Lovaina, KU Leuven, Lovaina, 10 marzo 2015.

POMBO, O., ALLACKER, K., RIVELA, B. and NEILA, J., 2015. Multi-criteria assessment of housing retrofitting solutions through the life cycle approach. A case study in Madrid. Presentación oral en *DS²BE*, Bruselas, 20-30 abril 2015.

POMBO, O., RIVELA, B. and NEILA, J., 2014. Is building renovation truly sustainable? The need for applying a multi-criteria assessment through life cycle approach. *World SB14 Barcelona*. Barcelona, pp. 16-22. ISBN 978-84-697-1815-5.

POMBO, O., RIVELA, B. and NEILA, J., 2014. Modelo de edificación para el análisis multicriterio de la rehabilitación del parque residencial madrileño de los años 1950-1980. *Constec*. Madrid, pp. 412-416. ISBN 978-84-617-0504-7.

POMBO, O., GARCÍA-ERVITI, F., RIVELA, B. and NEILA, J., 2014. Energy and economic survey of the renovation of a residential building wall in Madrid. *5th European conference on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Planning (EESAP)*. San Sebastián, pp. 187-194. ISBN: 978-84-9082-003-2.

References

- AHERN, C., GRIFFITHS, P. and O'FLAHERTY, M., 2013. State of the Irish housing stock—Modelling the heat losses of Ireland's existing detached rural housing stock & estimating the benefit of thermal retrofit measures on this stock. *Energy Policy*, vol. 55, pp. 139-151. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2012.11.039.
- ARDENTE, F., BECCALI, M., CELLURA, M. and MISTRETTA, M., 2011. Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 460-470. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2010.09.022.
- CHEN, T., BURNETT, J. and CHAU, C., 2001. Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong. *Energy*, vol. 26, no. 4, pp. 323-340. ISSN 03605442. DOI 10.1016/S0360-5442(01)00006-8.
- CUCHÍ, A. y PAGÈS, A., 2007. Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).
- CUCHÍ, A. and SWEATMAN, P., 2011a. A National Perspective on Spain's Buildings Sector. A Roadmap for a New Housing Sector.
- CUCHÍ, A. and SWEATMAN, P., 2012a. GTR report 2012: A national perspective on Spain's building sector. Action plan for a new housing sector. ISBN 9788461619177.
- DALL'O', G., GALANTE, A. and TORRI, M., 2012b. A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy and Buildings*, vol. 48, pp. 211-219.. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2012.01.034.
- EN 15643-2, 2011. Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Framework for the assessment of environmental performance.
- EN 15978, 2012. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method.
- GUERRA SANTIN, O., ITARD, L. and VISSCHER, H., 2009. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 11, pp. 1223-1232. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2009.07.002.
- GUERRA-SANTIN, O. and ITARD, L., 2010. Occupants' behaviour: determinants and effects on residential heating consumption. *Building Research & Information*, vol. 38, no. 3, pp. 318-338. ISSN 0961-3218. DOI 10.1080/09613211003661074.

HÄKKINEN, T., 2012. Systematic method for the sustainability analysis of refurbishment concepts of exterior walls. *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 783-790. ISSN 09500618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.084.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, 2013. Censos de Población y Viviendas 2011. Edificios y viviendas. Datos provisionales.

MATA, É., SASIC KALAGASIDIS, A. and JOHNSON, F., 2013. Energy usage and technical potential for energy saving measures in the Swedish residential building stock. *Energy Policy*, vol. 55, pp. 404-414. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2012.12.023.

MULLALLY, C., 1998. Home energy use behaviour: a necessary component of successful local government home energy conservation (LGHEC) programs. *Energy Policy*, vol. 26, no. 14, pp. 1041-1052. ISSN 03014215. DOI 10.1016/S0301-4215(98)00046-9.

NATIONAL HOUSING INSTITUTE, 2014. Population and Housing census 2011.

NEMRY, F., UIHLEIN, A., COLODEL, C.M., WETZEL, C., BRAUNE, A., WITTSTOCK, B., HASAN, I., KREISSI, J., GALLON, N., NIEMEIER, S. and FRECH, Y., 2010. Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs. *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 7, pp. 976-984. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2010.01.009.

OWENS, J. and WILHITE, H., 1988. Household energy behavior in Nordic countries—an unrealized energy saving potential. *Energy*, vol. 13, no. 12, pp. 853-859. ISSN 03605442. DOI 10.1016/0360-5442(88)90050-3.

POMBO, O., ALLACKER, K., RIVELA, B. and NEILA, J., 2016. Sustainability assessment of energy saving measures: a multi-criteria approach for residential buildings retrofitting—A case study of the Spanish housing stock. *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 384-394. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2016.01.019.

POMBO, O., RIVELA, B. and NEILA, J., 2014. Is building renovation truly sustainable? The need for applying a multi-criteria assessment through life cycle approach. World SB14 Barcelona. Barcelona, pp. 16-22.

SELIGMAN, C., DARLEY, J.M. and BECKER, L.J., 1978. Behavioral approaches to residential energy conservation. *Energy and Buildings*, vol. 1, no. 3, pp. 325-337. ISSN 03787788. DOI 10.1016/0378-7788(78)90012-9.

STEG, L., 2008. Promoting household energy conservation. *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4449-4453. ISSN 03014215. DOI 10.1016/j.enpol.2008.09.027.