



TESIS DOCTORAL  
MIGUEL Á. GARCÍA FUENTES

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE TOMA DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO A LA  
REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE ÁREAS URBANAS RESIDENCIALES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN ARQUITECTURA

TESIS DOCTORAL  
APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE TOMA DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO A LA  
**REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE  
ÁREAS URBANAS RESIDENCIALES**

PRESENTADA POR:  
MIGUEL ÁNGEL GARCÍA FUENTES  
PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

DIRIGIDA POR:  
DR. ALBERTO MEISS RODRÍGUEZ  
DR. JESÚS FEIJÓ MUÑOZ



Universidad de Valladolid



Escuela de Doctorado Universidad de Valladolid



Universidad de Valladolid



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN ARQUITECTURA

TESIS DOCTORAL

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE TOMA DE DECISIÓN MULTI-CRITERIO A LA  
**REHABILITACIÓN ENERGÉTICA DE  
ÁREAS URBANAS RESIDENCIALES**

APPLICATION OF MULTI-CRITERIA DECISION MAKING TECHNIQUES TO  
ENERGY EFFICIENT RETROFITTING OF BUILDINGS AT DISTRICT SCALE

PRESENTADA POR:

**MIGUEL ÁNGEL GARCÍA FUENTES**

PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

DIRIGIDA POR:

DR. ALBERTO MEISS RODRÍGUEZ

DR. JESÚS FEIJÓ MUÑOZ



# Índice

<b>Índice de figuras</b> .....	<b>9</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>11</b>
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>15</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>19</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>21</b>
<b>Acerca de la tesis</b> .....	<b>25</b>
Mención de Doctorado Internacional.....	26
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>29</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>33</b>
<b>2 Investigación. Objetivos, metodología e hipótesis</b> .....	<b>41</b>
2.1 Justificación .....	41
2.2 Objetivos .....	44
2.2.1 Objetivos generales .....	44
2.2.2 Objetivos específicos .....	44
2.3 Medios y recursos .....	45
2.4 Metodología .....	47
2.4.1 Investigación sobre el proceso de rehabilitación energética .....	48
2.4.2 Generación de una metodología integral que mejore el proceso de la rehabilitación energética a escala de distritos .....	50
2.4.3 Selección de indicadores .....	53
2.4.4 Integración del sistema de indicadores e implementación de técnicas multi-criterio.....	55
2.4.5 Identificación de técnicas de soporte a la toma de decisiones.....	57

2.4.6	Generación de una herramienta del sistema de evaluación e integración en una herramienta automática de generación de escenarios .....	59
2.4.7	Validación del sistema de indicadores y de las técnicas de evaluación en un caso de estudio .....	62
2.5	Hipótesis.....	65
<b>3</b>	<b>Estado del arte .....</b>	<b>69</b>
3.1	Metodologías de interacción entre los agentes de la rehabilitación .....	70
3.1.1	Comparativa entre un proyecto tradicional y la metodología IPD .....	71
3.1.2	BIM e IPD.....	73
3.2	Herramientas de soporte al diseño de proyectos de rehabilitación energética.....	74
3.3	Esquemas de evaluación y estrategias de optimización de escenarios de rehabilitación energética.....	76
3.3.1	Técnica de lógica difusa.....	78
3.3.2	Sistema de comparación por pares .....	79
3.4	Avances sobre el estado del arte .....	81
<b>4</b>	<b>Metodología de soporte al diseño de proyectos de rehabilitación energética de barrios basada en una aproximación de análisis multicriterio.....</b>	<b>85</b>
4.1	Introducción.....	85
4.2	Marco metodológico basado en 4 etapas para la rehabilitación energética de barrios.....	87
4.2.1	Etapa I – Auditoría .....	88
4.2.2	Etapa II – Evaluación de MAES y diseño integral óptimo .....	89
4.2.3	Etapa III – Implementación de las MAES, operación y mantenimiento .....	89
4.2.4	Etapa IV – Medida y Verificación de ahorros energéticos y plan de aceptación .....	89
4.3	Desarrollo de una metodología de soporte a la toma de decisiones .....	91
4.3.1	Identificación y definición del responsable de la toma de decisiones .....	93
4.3.2	Definición del objetivo de la toma de decisiones .....	93
4.3.3	Formulación de escenarios y selección de criterios.....	94
4.3.4	Toma de decisiones multi-criterio .....	96
4.3.5	Selección del escenario: validación final.....	102
4.4	Resultados .....	102

4.4.1	Generación de la matriz de evaluación para dar soporte a la toma de decisiones .....	102
4.4.2	Implementación a un caso de estudio: Cuatro de Marzo (Valladolid) .....	105
4.5	Discusión y conclusiones .....	110
<b>5</b>	<b>Marco de evaluación como soporte a la optimización de escenarios de rehabilitación energética a escala de barrio .....</b>	<b>115</b>
5.1	Introducción.....	115
5.2	La aproximación de OptEEmAL .....	119
5.2.1	Definición del problema.....	119
5.2.2	Simulación y cálculo de los indicadores de comportamiento del distrito para la línea base .....	120
5.2.3	Generación de escenarios a través de un catálogo de MAES.....	121
5.2.4	Evaluación y optimización .....	121
5.2.5	Búsqueda de los escenarios óptimos .....	122
5.3	Metodología .....	122
5.3.1	Selección de los criterios de evaluación.....	123
5.3.2	Definición del problema de optimización .....	124
5.3.3	Constucción de la función coste-beneficio .....	125
5.4	Caso de estudio: validación del método de evaluación en un entorno controlado .....	132
5.4.1	Descripción del caso de estudio .....	133
5.4.2	Cálculo de los DPIs para la línea base y para los escenarios .....	134
5.4.3	Definición del sistema de ponderación, objetivos, condiciones de contorno y cálculo de valores de coste y beneficio .....	135
5.5	Resultados y discusión .....	137
5.5.1	Observación de los gráficos de coste y beneficio .....	137
5.5.2	Observación del frente de Pareto .....	141
5.6	Conclusiones .....	142
5.6.1	Validación del método de evaluación .....	143
5.6.2	Limitaciones y consideraciones .....	144
5.6.3	Líneas de investigación futuras.....	145
<b>6</b>	<b>Integración de criterios de priorización en el diseño de proyectos de rehabilitación energética a escala de distrito: un caso de estudio .....</b>	<b>148</b>
6.1	Introducción.....	148

6.2	La herramienta OptEEmAL .....	150
6.2.1	Interacción de los agentes e importancia de los criterios de priorización .....	153
6.2.2	Transformación de información subjetiva en un problema matemático ....	154
6.3	Metodología.....	155
6.3.1	Construcción de las funciones coste-beneficio .....	155
6.3.2	Generación de esquemas de ponderación .....	158
6.3.3	Configuración de esquemas de ponderación pre-definidos .....	159
6.4	Caso de estudio: barrio de Cuatro de Marzo (Valladolid).....	161
6.4.1	Introducción general .....	161
6.4.2	Edificios objeto del estudio .....	161
6.4.3	Elaboración de los datos de entrada .....	162
6.4.4	Configuración del problema: inserción de datos y uso de la herramienta .....	162
6.4.5	Lanzamiento del proceso de optimización y visualización de resultados .....	166
6.5	Resultados .....	167
6.5.1	Condiciones pre-existentes .....	167
6.5.2	Escenarios candidatos propuestos en el marco de cada esquema de priorización .....	168
6.5.3	Valores de las funciones coste y beneficio para cada esquema de priorización .....	170
6.5.4	Validación de los resultados con datos reales de operación.....	173
6.6	Discusión .....	175
6.7	Conclusiones y líneas futuras.....	178
<b>7</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>183</b>
7.1	Conclusiones en relación al cumplimiento de los objetivos .....	184
7.2	Conclusiones en relación a la metodología .....	186
7.3	Conclusiones en relación a los resultados.....	189
<b>8</b>	<b>Conclusions .....</b>	<b>193</b>
8.1	Conclusions in relation to the fulfilment of the objectives .....	194
8.2	Conclusions in relation to the methodology .....	196
8.3	Conclusions in relation to the results .....	199
<b>9</b>	<b>Líneas futuras de investigación .....</b>	<b>205</b>

<b>10</b>	<b>Future research lines</b>	<b>207</b>
<b>11</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>211</b>
11.1	Introducción	211
11.2	Investigación. Objetivos, metodología e hipótesis	212
11.3	Estado del arte	213
11.4	Artículo 1: Metodología innovadora de soporte al diseño de proyectos de rehabilitación energética de barrios basada en un enfoque de análisis de decisiones multicriterio	214
11.5	Artículo 2: Marco de evaluación como soporte a la optimización de escenarios de rehabilitación energética de edificios a escala de barrio	215
11.6	Artículo 3: Impacto de los criterios de priorización en el diseño de proyectos de rehabilitación energética de barrios: un caso de estudio	218
<b>12</b>	<b>Anexos</b>	<b>225</b>
12.1	Artículos publicados objeto de la tesis	225
12.2	Factor de impacto y área temática de las publicaciones	225
12.3	Justificación de las contribuciones del doctorando a los artículos	226
12.4	Artículos complementarios del doctorando	226
12.4.1	Artículos en revistas	227
12.4.2	Capítulos de libros	228
12.4.3	Contribución a congresos y conferencias nacionales	228
12.4.4	Contribución a congresos y conferencias internacionales	229
<b>13</b>	<b>Copia de los artículos publicados objeto de la tesis doctoral y artículos complementarios</b>	<b>235</b>





## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.....	33
<b>Figura 2.</b> Objetivos de la UE en materia de cambio climático para los años 2020, 2030 y 2050 [10].....	35
<b>Figura 3.</b> Metodología general de la investigación. ....	47
<b>Figura 4.</b> Marco metodológico de rehabilitación energética.....	50
<b>Figura 5.</b> Esquema metodológico del proceso integrado en la herramienta OptEEmAL. ....	59
<b>Figura 6.</b> Proyecto de 1947 viviendas protegidas en Valladolid en el barrio del Cuatro de Marzo. Plano de situación del proyecto original [25]. ....	63
<b>Figura 7.</b> Proyecto de 1947 viviendas protegidas en Valladolid en el barrio del Cuatro de Marzo. Alzado de Vivienda tipo [25].....	64
<b>Figura 8.</b> Planos extraídos del modelo de BIM generado con Autodesk Revit™. Vivienda tipo.....	64
<b>Figura 9.</b> Proyecto tradicional y proyecto integrado. Adaptado de: AIA California Council [30]. ....	73
<b>Figura 10.</b> Jerarquía de índices e indicadores empleada en la presente investigación. ....	79
<b>Figura 11.</b> Propuesta de metodología para rehabilitación de distritos [136]. ....	87
<b>Figura 12.</b> Pasos del proceso de soporte a la toma de decisiones. ....	92
<b>Figura 13.</b> Descripción de las tecnologías en el catálogo [55].....	94
<b>Figura 14.</b> Fotografía del distrito de Cuatro de Marzo .....	105
<b>Figura 15.</b> Proceso desplegado en la herramienta. Adaptado de [82]. ....	120
<b>Figura 16.</b> Esquema del proceso de evaluación.....	121
<b>Figura 17.</b> Jerarquía del proceso de toma de decisiones. ....	127
<b>Figura 18.</b> Esquemas de ponderación pre-definidos 2 (distrito de energía casi nula) (a) y esquema pre-definido 2A (distrito de energía casi nula + consideraciones económicas) (b).....	137

<b>Figura 19.</b> Esquemas de ponderación pre-definidos 2 (distrito neutro en carbono) (a) y esquema pre-definido 2A (distrito neutro en carbono + consideraciones económicas) (b).....	138
<b>Figura 20.</b> Esquemas de ponderación pre-definidos 3 (generación energética a través de renovables) (a) y esquema pre-definido 3A (generación energética a través de renovables + consideraciones económicas) (b).....	139
<b>Figura 21.</b> Esquema de ponderación 6A (aspectos ambientales + consideraciones económicas). .....	140
<b>Figura 22.</b> Esquema de la herramienta OptEEmAL. ....	153
<b>Figura 23.</b> Ejemplo de representación de las funciones coste beneficio para los escenarios óptimos.....	156
<b>Figura 24.</b> Edificios seleccionados en el distrito de Cuatro de Marzo. ....	162
<b>Figura 25.</b> Representación gráfica de los escenarios en cada esquema de priorización. ....	172

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Barreras asociadas a los procesos de rehabilitación energética. ....	43
<b>Tabla 2.</b> Comparativa entre un proceso tradicional e IPD [29]. ....	72
<b>Tabla 3.</b> Herramientas de evaluación existentes [32]. ....	75
<b>Tabla 4.</b> Escala fundamental de números absolutos [39]. ....	80
<b>Tabla 5.</b> Matriz de comparación por pares de los principales criterios con respecto al objetivo .....	81
<b>Tabla 6.</b> Indicadores de Sostenibilidad de Distrito .....	96
<b>Tabla 7.</b> Cuestionarios de lógica difusa distribuidos a los expertos .....	101
<b>Tabla 8.</b> Matriz de evaluación para los escenarios candidatos .....	103
<b>Tabla 9.</b> Generación de escenarios para la rehabilitación de Cuatro de Marzo. ....	108
<b>Tabla 10.</b> Resultado de los índices para los escenarios planteados para la rehabilitación en Cuatro de Marzo.....	108
<b>Tabla 11.</b> Indicadores de sostenibilidad del distrito para el estado actual y el estado tras la rehabilitación. ....	109
<b>Tabla 12.</b> Lista de Indicadores de Comportamiento del Distrito (DPIs) para cada grupo.....	124
<b>Tabla 13.</b> Escala fundamental de números absolutos. Adaptado de [101] .....	128
<b>Tabla 14.</b> Matrices de comparación por pares. Matriz 1 (coste) .....	129
<b>Tabla 15.</b> Matrices de comparación por pares. Matriz 2 (beneficios – nivel 1).....	130
<b>Tabla 16.</b> Matrices de comparación por pares. Matriz 3 (beneficios – nivel 2).....	130
<b>Tabla 17.</b> Ponderación de indicadores para generar las funciones coste-beneficio .....	131
<b>Tabla 18.</b> Descripción del caso de estudio. ....	133
<b>Tabla 19.</b> Lista de escenarios generados para la validación.....	134
<b>Tabla 20.</b> Lista de herramientas empleadas para el cálculo de los indicadores. ....	135
<b>Tabla 21.</b> Resumen del frente de Pareto y de valores de coste y beneficio. ....	141
<b>Tabla 22.</b> Lista de indicadores (DPIs) que conforman la función coste-beneficio.....	156
<b>Tabla 23.</b> Pesos establecidos para los esquemas pre-definidos. ....	160

<b>Tabla 24.</b> MAES propuestas para el caso de estudio. ....	165
<b>Tabla 25.</b> Características del proceso de optimización lanzado.....	167
<b>Tabla 26.</b> Valores de los indicadores para las condiciones pre-existentes en Cuatro de Marzo. ....	167
<b>Tabla 27.</b> MAES propuestas para el esquema de priorización 1. ....	168
<b>Tabla 28.</b> MAES propuestas para el esquema de priorización 2. ....	169
<b>Tabla 29.</b> MAES propuestas para el esquema de priorización 3. ....	170
<b>Tabla 30.</b> Valores de los indicadores para los escenarios del frente de Pareto bajo los tres esquemas de priorización.....	171
<b>Tabla 31.</b> Comparación de los valores de los indicadores de las simulaciones y datos reales de operación. ....	174
<b>Tabla 32.</b> Comparación de las MAES propuestas en el escenario rehabilitado y el óptimo propuesto. ....	175
<b>Tabla 33.</b> Relación de factor de impacto y área temática de las publicaciones. ....	225
<b>Tabla 34.</b> Justificación de las contribuciones del doctorando a los artículos.....	226
<b>Tabla 35.</b> Listado de artículos seleccionados por su relevancia para la tesis doctoral.....	235

# AGRADECIMIENTOS



## Agradecimientos

Pensé muchas veces en escribir esta página. Ahora todavía me cuesta creer estar haciéndolo. Casi todas las páginas de agradecimientos parecen iguales, aunque cada una lleva un sello que solo el que lo escribe y algunos de los que la leen lo perciben. Espero que aquellos que son capaces de sentir ese sello reconozcan también el agradecimiento que les guardo por haber formado parte de esto, a pesar de que no todos puedan aparecer aquí mencionados por cuestiones lógicas de espacio.

Caí en este tema gracias a muchas personas y a un alineamiento perfecto de astros. En los momentos complicados de la crisis (aquella de 2008), y en medio de mis estudios de Máster, las casualidades confluyeron para llevarme a la Agencia Energética Municipal de Valladolid y de allí al Centro Tecnológico CARTIF. Aunque en realidad todo comenzó antes, y es más que justo agradecer primero a mis compañeros Urcomantes todo lo que aprendí y lo que vivimos juntos. Una experiencia que contribuyó a dirigir mis pasos hacia este camino de la Eficiencia Energética de edificios.

Y en ese viaje entre antiguo Urcomante e investigador en CARTIF, se cruzaron personas que me han acompañado en todo este camino y que han hecho esto posible. El primero de ellos mi tutor y director de tesis, Alberto Meiss, con quien además de haber trabajado todo este tiempo he trabado una gran amistad y con quien siempre es un placer charlar sobre lo profesional y sobre la vida. Y, junto a él, mi también director de tesis Jesús Feijó, quien me ha apoyado durante todo este proceso y de quien guardo un gran aprendizaje de mis años en la Casa Solar. Gracias a los dos.

Mi tesis es el resultado de muchas horas de trabajo y dedicación a proyectos en los que he tenido la oportunidad (y la suerte) de trabajar gracias a CARTIF y a la familia que lo forma. Un montón de personas que han marcado mi camino y a los que tengo que agradecerles todo lo que he aprendido y que he intentado trasladar a estas páginas. Resulta imposible mencionar a todas las huellas que hay en este trabajo, pero sí que me gustaría destacar a Susana, por enseñarme cada día, a Rubén, porque es un placer trabajar codo con codo, a Sergio, por esa



confianza infinita, y muy especialmente a Cristina, por hacer que cualquier reto parezca extremadamente fácil.

Y también, gracias a los magníficos equipos con los que he trabajado en los dos proyectos que han servido de base a esta tesis doctoral y que muchos de ellos aparecen como co-autores de las publicaciones que en ella se incluyen: Cecilia, José, Víctor, Gema, Sonia, Dimitrios, Maxime, y un largo etcétera. Ha sido muy enriquecedor el trabajo con vosotros.

Gracias a mis amigos, los que siempre estáis ahí y no dejáis de preguntar: ¿cuándo terminas la tesis? Por fin aquí la tenéis.

Gracias a mi familia, a mis padres y a mi hermano por el apoyo infinito y por sentirnos orgullosos de cada logro que he conseguido, y a mis abuelos, que leerán esta tesis desde ese lugar en el que están, sonriendo al ver que he llegado hasta aquí.

Y gracias a ti, Lorena, por ser mi compañera de viaje, de bailes y de sueños. Por hacer que los momentos buenos lo sean más, y que los malos no lo sean tanto.

**RESUMEN**

***ABSTRACT***



## Resumen

La rehabilitación energética de edificios es, indudablemente, uno de los aspectos clave en la transición energética justa. El objetivo de este tipo de actuaciones no es únicamente la reducción del consumo de energía o de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también cuestiones fundamentales como la mejora de las condiciones de confort o combatir la pobreza energética.

Sin embargo, la cuestión sobre la rehabilitación energética se ve afectada por importantes barreras que hacen que las tasas de rehabilitación sean radicalmente bajas. Algunas de estas barreras son de índole técnico, económico o legal pero también aparecen otras, de igual importancia, propias del proceso. Estas barreras están fundamentalmente relacionadas con la fragmentación de la cadena de valor, el reto de la integración de los intereses de los diferentes agentes o el uso de herramientas que reduzcan los tiempos del proceso a la vez que permitan encontrar las soluciones óptimas.

La presente tesis doctoral ha trabajado en este ámbito con el objetivo de generar y validar un sistema de evaluación que permita dar soporte al proceso de toma de decisiones. Este sistema se basa en la integración de las prioridades de los actores involucrados en la cadena de valor, así como en la implementación de técnicas de decisión multi-criterio que permiten evaluar, comparar y optimizar las alternativas de diseño. Además, el enfoque de este sistema integra la cuestión de la escala, buscando maximizar los beneficios derivados de considerar el distrito como unidad energética.

La tesis doctoral se presenta como compendio de publicaciones en revistas de impacto y, además, optando a la mención de Doctor Internacional.



## Abstract

Buildings' renovation is, certainly, one of the key pillars towards a just energy transition. The objective of interventions in buildings is not only the reduction of the energy consumption or associated GHG emissions, but also relevant issues as the improvement of the comfort conditions or the eradication of energy poverty.

However, the issue of energy retrofitting is highly conditioned by the important barriers that result into really low rates of buildings' stock renovation. Some of these are based on technical, financial or legal elements but there are also others with equal importance related to the process. These barriers are mainly linked to the fragmentation of the value chain, the challenge of integrating the interests of all the stakeholders or the use of tools that reduce the time while allowing the identification of the optimal scenarios.

This doctoral thesis has focused its investigation into this field aiming at generating and validating an evaluation system that allows supporting the decision making process. This system is based on the integration of the stakeholders involved in the process as well as the implementation of multi-criteria decision making techniques to evaluate, compare and optimise retrofitting design alternatives. Moreover, this evaluation system has been designed to integrate the issue of the scale, aiming at maximising the benefits derived from considering the district as an energy unit.

The thesis is presented as a compendium of journal publications and opting to the grade of International PhD.



**ACERCA DE LA TESIS**





## Acerca de la tesis

La presente tesis se ha desarrollado como compendio de publicaciones que se enmarcan dentro de dos proyectos internacionales de investigación en el ámbito de la rehabilitación energética de edificios a nivel de distrito.

Esta investigación ha permitido desarrollar y validar un sistema de evaluación que integra técnicas de toma de decisiones multi-criterio para dar soporte al diseño de proyectos de rehabilitación energética de áreas urbanas residenciales. Cada uno de los artículos supone un elemento fundamental de la investigación, donde el primero de ellos establece el marco metodológico general y una primera aproximación al sistema de evaluación, el segundo profundiza en el sistema de evaluación e integra nuevas técnicas para su mejora, y el tercero lo valida sobre un conjunto de edificios pertenecientes al distrito del Cuatro de Marzo, en la ciudad de Valladolid.

La relación del doctorando con la temática se inició durante su realización del Trabajo Fin de Máster, que ya abordaba técnicas de optimización del rendimiento energético, en este caso aplicado a un proyecto piloto sobre una vivienda autosuficiente. Durante este tiempo, además, comenzó su andadura en el Centro Tecnológico CARTIF, donde su actividad investigadora comenzó con sus trabajos sobre interoperabilidad entre herramientas de modelado de información de edificios y herramientas de simulación. Posteriormente esos conocimientos le permitieron adentrarse en nuevas temáticas complementarias, en este caso acerca de la rehabilitación energética de áreas urbanas residenciales y, en particular, trabajando en el desarrollo de metodologías que permiten mejorar el proceso, desde la fase de diseño, hasta la medida y verificación de los ahorros energéticos tras la intervención. Esta actividad se llevó a cabo en el marco del proyecto R2CITIES, financiado por la Comisión Europea con número de contrato 314473.

Dentro de esta metodología, una parte fundamental supuso la generación de un sistema que permitiese transformar las opiniones subjetivas de los agentes involucrados en el proceso de la rehabilitación en un sistema de evaluación multi-criterio donde cuantificar la

importancia otorgada a cada uno de ellos. Esta semilla dio lugar a la preparación de una propuesta para un nuevo proyecto con fondos de la Comisión Europea, cuya preparación fue liderada por el doctorando.

Este proyecto titulado OptEEmAL (financiado por la Comisión Europea con número de contrato 680676) permitió transformar la metodología generada anteriormente en una herramienta que automatizase parte del proceso, y que integrase el sistema de evaluación como componente esencial para la optimización de los diferentes escenarios de rehabilitación energética, considerando estos como la combinación de medidas de conservación de la energía.

Este desarrollo se refleja en las tres publicaciones que componen esta tesis doctoral donde, además, el sistema de evaluación desarrollado está integrado en una herramienta que ha sido validada en varios casos reales demostrando su viabilidad para dar soporte al proceso de diseño de proyectos de rehabilitación energética de edificios a escala de barrio.

## Mención de Doctorado Internacional

Además, el doctorando solicita la mención de “Doctor Internacional”, concurriendo las circunstancias establecidas en el Artículo 15 del RD99/2011 por el que se regulan las enseñanzas oficiales de doctorado. Estas circunstancias son:

- Durante el desarrollo de la tesis doctoral, el doctorando realizó una estancia con una duración de tres meses en la *School of Architecture, Design and Built Environment* de la *Nottingham Trent University* entre septiembre de 2015 y diciembre de 2015.
- Parte de esta tesis doctoral se encuentra redactada en inglés, incluyendo los artículos que la componen, así como el resumen y las conclusiones.
- La tesis ha sido informada por dos expertas Doctoras pertenecientes a las siguientes instituciones no españolas: el *Centro de Investigaçã o em Ciências da Informação, Tecnologias e Arquitetura* del *Instituto Universitário de Lisboa* y el *Energy Institute* de la *Istanbul Technical University*.

# NOMENCLATURA



## Nomenclatura

AHP	Analytics Hierarchical Process
BIM	Building Information Modeling
COM	Indicadores de confort
CTE	Código Técnico de la Edificación
DDM	District Data Model
DECN	Distrito de Energía Casi Nula
DPI	District Performance Indicators
DSI	District Sustainability Indicators
EC	European Commission
EECN	Edificio de Energía Casi Nula
EERR	Energías Renovables
ECM	Energy Conservation Measures
ECO	Indicadores Económicos
ENE	Indicadores Energéticos
ENV	Indicadores Ambientales
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GHG	Greenhouse Gas
GUI	Graphical User Interface
HVAC	Heating, ventilation and air conditioning
IDAE	Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía
IFC	Industry Foundation Classes
INV	Instituto Nacional de Vivienda
IPD	Integrated Project Delivery
ISO	International Organisation of Standardisation
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costs
M&V	Medida y Verificación
MAVT	Multi-attribute Value Theory

MAES	Medidas de Ahorro de Energía
MCDA	Multi-criteria Decision Analsis
NZEB	Nearly Zero Energy Building
ONG	Organización No Gubernamental
OSH	Obra Sindical del Hogar
OWL	Web Ontology Language
PIB	Producto Interior Bruto
PMT	Project Management Team
PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
RD	Real Decreto
SCIS	Smart Cities Information System

# INTRODUCCIÓN





# 1 Introducción

Según la *ONG Global Footprint Network* [01], en 2019 el día de déficit ecológico se alcanzó el 29 de julio, cuando el consumo de recursos naturales superó a los que el planeta tiene capacidad para generar en todo el año. Este día, conocido con el *Earth Overshoot Day* (EOD), cada año se alcanza de una manera más temprana, adelantándose del 29 de diciembre en 1970 a finales de julio en 2019. De la misma manera, la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida fue mayor del que todos los bosques tienen capacidad para absorber. Ese mismo estudio indica que los seres humanos ya requerimos 1,7 planetas para satisfacer nuestras necesidades.

Para hacer frente a este reto y garantizar la sostenibilidad de nuestro planeta y las generaciones futuras, en 2015 la Organización de Naciones Unidas aprobó los 17 objetivos para mejorar nuestro mundo en su Agenda 2030 [02] (Figura 1). Estos objetivos buscan dar respuesta a los retos sobre el acceso a los alimentos, la eliminación de las desigualdades, el fin de la pobreza o la acción por el clima. Y, por supuesto, la mejora de la sostenibilidad energética.



Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.

Este último objetivo requiere de una profunda transformación cultural, social y económica no exenta de dificultades y barreras que bloquean la implementación de una transición energética justa y ecológica.

Numerosos planes y estrategias se han desarrollado e implementado en los últimos años para dar respuesta a este objetivo, recogiendo, muchos de ellos, dentro del denominado “Paquete de Invierno: Energía Limpia para todos los Europeos” [03]. Este paquete estableció en mayo de 2016 una serie de medidas para lograr los compromisos del Acuerdo de París [04] y vino a reescribir el marco político energético de la UE. Dentro de su estrategia proponía una serie de medidas y directivas para estimular y reforzar los derechos de los consumidores, colocándoles en el centro de la transición energética. Su estructura incluye las 5 dimensiones de la Unión Energética [05]: la (1) seguridad energética, (2) el mercado energético interno, (3) la eficiencia energética, (4) la descarbonización de la economía y, (5) la investigación, innovación y competitividad [06].

Este nuevo marco normativo y político, enmarcado dentro del Paquete de Invierno, fija además los objetivos vinculantes para la UE en el marco temporal hasta 2030. Estos objetivos son: la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 40% respecto a los valores de 1990, la incorporación del 32% de renovables sobre el consumo total de energía bruta, la mejora de la eficiencia energética en un 32,5%, y establecer un 15% de interconexión eléctrica de los Estados Miembros [07] tal y como refleja la Figura 2. Por otro lado, el *European Green Deal* [08] propone incrementar el objetivo de reducción de emisiones hasta al menos un 50% y buscando alcanzar de manera responsable un 55%. En este sentido se está llevando a cabo un proceso de consulta pública<sup>1</sup> que contribuirá al plan de la Comisión Europea para revisar el objetivo de reducción de emisiones a 2030, previsto en septiembre de 2020<sup>2</sup>.

Más allá de los objetivos establecidos para 2030, aparece un nuevo marco temporal que establece como objetivo la descarbonización total de la economía para 2050, buscando que la Unión Europea alcance la neutralidad climática en ese año. Este objetivo, que aparece dentro de la Comunicación de la Comisión Europea “Un planeta limpio para todos. La visión estratégica europea a largo plazo de una economía próspera, moderna, competitiva y climáticamente neutra” [07], requiere un cambio drástico en todos los sectores que están relacionados con la economía energética y climática. Este cambio, además, no es posible sin una profunda

---

<sup>1</sup> El proceso de consulta tiene prevista su finalización en junio de 2020, por lo que en el momento de redacción de esta tesis doctoral se encontraba abierto.

<sup>2</sup> Estas previsiones se pueden ver afectadas por la situación actual debido a la pandemia provocada por la COVID-19, que puede afectar tanto los plazos previstos como los objetivos establecidos.

transformación social que convierta en parte activa de la transición energética a todos los miembros de la sociedad.

A nivel nacional, en 2019 el Ministerio para la Transición Ecológica, junto con el Instituto para la Diversificación de la Energía (IDAE), lanzan el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC) [09], que establece la estrategia en España para alcanzar la contribución necesaria a los objetivos establecidos a nivel europeo.

El sector de la edificación juega un papel fundamental en esta transición, puesto que representa aproximadamente el 40% del consumo energético, y para el que ya se han establecido objetivos cuantificables a nivel nacional e internacional. El PNIEC establece para los edificios residenciales una reducción esperada de su consumo de energía final en aproximadamente 6700 ktep acumuladas en los próximos 10 años.

Los mecanismos para lograr este objetivo pasan por aumentar progresivamente el número de viviendas rehabilitadas de 30.000 viviendas/año en 2021 a 300.000 en 2030 así como la renovación de las instalaciones térmicas (individuales y centralizadas) en más de 300.000 viviendas/año y la sustitución de 2.443.000 electrodomésticos al año por otros pertenecientes a la clase más alta de eficiencia energética. Esto supone la reducción del consumo en el sector residencial del 18% [09]. Para lograr este objetivo y sentar las bases para garantizar la descarbonización de la economía en 2050, es necesaria una profunda transformación del sector, técnica, económica y socialmente.

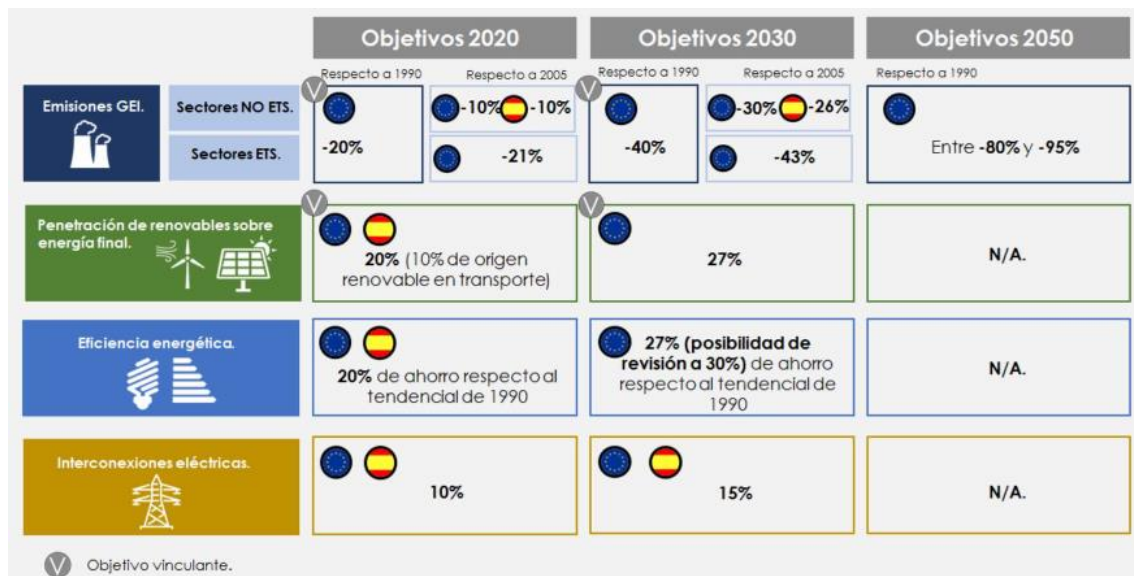


Figura 2. Objetivos de la UE en materia de cambio climático para los años 2020, 2030 y 2050 [10].

En línea con los objetivos establecidos y mencionados anteriormente, el Ministerio de Fomento establece en 2019 un Proyecto de Real Decreto para la modificación del Real Decreto 314/2006 por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE) [11], y, además, comienza la revisión del Real Decreto 564/2017 que establece el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios [12].

Esta modificación del CTE, en lo referente al DB-HE, establece los criterios exigibles a los edificios para lograr los objetivos referentes al sector de la construcción, y actualiza el concepto de Edificio de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN), que se definió reglamentariamente en la Orden FOM/588/2017, y que es de aplicación obligatoria a partir de 2019.

Esta modificación del CTE, así como el concepto de los EECN, están enfocados esencialmente a los nuevos edificios, donde los retos tecnológicos o económicos son relativamente sencillos de asumir. Las tecnologías existentes hacen viable lograr el balance neutro de los edificios nuevos, mientras que en edificios anteriores al CTE la inversión necesaria para integrarlas resulta en un modelo muchas veces económicamente inviable.

Sin embargo, para lograr los objetivos establecidos por el Paquete de Invierno, el PNIEC a nivel nacional, o la meta de lograr la neutralidad climática en 2050, el foco debe estar necesariamente en el parque edificado. En este aspecto, las tasas de renovación en el sector residencial todavía son muy bajas, alcanzando aproximadamente el 1% de media a nivel Europeo mientras que en España (entre el 0.3% con intervenciones profundas y el 2.1% con intervenciones ligeras) [13] se evidencia un ritmo rehabilitador muy escaso que “acelera y agrava procesos de degradación a menudo iniciados por otras razones de tipo social y económico” [14].

El ámbito de la rehabilitación energética presenta ciertas dificultades no presentes en los nuevos edificios, lo que hace que sean necesarios cambios tanto en el proceso como en otros aspectos como en el desarrollo de nuevas tecnologías o modelos de negocio. Ciertas corrientes establecen que la descarbonización del sector de la construcción (así como de otros sectores como el transporte) pasa por la electrificación de los edificios y su combinación con ciertas soluciones, como redes de calor o frío, en algunos casos puntuales. Una electrificación que necesariamente debe basarse en una integración masiva de energías renovables en la producción de la electricidad necesaria, además de una descentralización de la misma, pasando de modelos donde los edificios sean únicamente consumidores a otros escenarios donde sean además productores de energía y contribuyan a la red. Este proceso, sin embargo, requiere de

nuevas soluciones y tecnologías, como nuevos equipos de bomba de calor que ofrezcan mejores rendimientos a temperaturas de impulsión necesarias para compatibilizarlos con los sistemas de distribución existentes en los edificios ya construidos, o nuevos sistemas de gestión para la integración en red o garantizar la flexibilidad de la demanda para optimizar la producción y evitar un sobredimensionamiento innecesario de la infraestructura.

Además de estos retos tecnológicos, donde se están realizando grandes avances, existen otros retos y barreras que dificultan todavía el desbloqueo del potencial existente en la rehabilitación energética de edificios. Barreras, por ejemplo, financieras, como los costes de la rehabilitación o el acceso a la financiación; técnicas, como el desconocimiento de algunas tecnologías; regulatorias, como la modificación constante de los criterios y del marco normativo; y de concienciación, como la falta de información sobre los beneficios y de compromiso con la necesidad de contribuir a la transición energética.

Pero de todas estas barreras, quizás las más destacables sean las del proceso, donde existe una gran desfragmentación de la cadena de valor y donde la aparición de agentes con diferentes perfiles e intereses dificultan el consenso sobre las mejores estrategias para la rehabilitación. A esta barrera se une la existente en las herramientas, que en lugar de fomentar la cooperación entre los agentes, generalmente la dificultan mediante la falta de interoperabilidad entre las mismas. Esto requiere la generación de diferentes modelos que permitan prever el comportamiento de los edificios bajo las diferentes combinaciones de tecnologías, lo que supone un proceso que consume mucho tiempo, y que es susceptible de errores humanos. Por tanto, son necesarias nuevas herramientas que contribuyan a mejorar los métodos de trabajo e integrar a los agentes y a la información de manera más eficiente y eficaz.

Además, existe otro factor decisivo para garantizar el fomento de los proyectos de rehabilitación energética: la escala. Un cambio de escala, de nivel de edificio a nivel de barrio o distrito hace que desaparezcan o se suavicen algunas de las barreras como pueden ser las tecnológicas o las económicas, ya que algunas tipologías permiten integrar soluciones que pueden contribuir al balance del conjunto y que no se pueden integrar en otras tipologías. Además, esto contribuye a la aplicación de economías de escala, que puede reducir la necesidad de inversión inicial o garantizar el acceso a modelos de negocio que, en otros casos, son inviables.

Considerando todos estos factores, la presente tesis pretende contribuir a mejorar el proceso mediante la generación de un sistema de evaluación donde la integración de técnicas de decisión multi-criterio sirvan para dar soporte a la identificación de los mejores escenarios

de rehabilitación en base a los criterios de los agentes involucrados en la cadena de valor del proceso de rehabilitación energética, y donde esta evaluación se realiza a nivel de distrito.

Esta investigación comenzó como parte de los trabajos desarrollados en el proyecto europeo R2CITIES, financiado por la Comisión Europea y que entre sus acciones llevaba a cabo la rehabilitación energética del barrio del Cuatro de Marzo en Valladolid. La experiencia adquirida en este proyecto permitió el desarrollo de una metodología que buscaba mejorar el proceso, y que integraba un primer sistema de evaluación que permitió desarrollar un método para poder identificar los escenarios óptimos para la rehabilitación. Ese marco inicial, y su metodología, sirvió de semilla para un segundo proyecto, también financiado por la Comisión Europea, llamado OptEEmAL. Este proyecto internacional, coordinado por el doctorando permitió transformar esa metodología en una herramienta de soporte al proceso de diseño de proyectos de rehabilitación, automatizando algunas de las fases del proceso, y logrando una mejor interacción entre agentes, herramientas e información.

Este sistema de evaluación, que ha evolucionado a lo largo del desarrollo de la investigación integrando nuevos elementos, forma actualmente parte de la herramienta OptEEmAL, que ha sido validada en varios casos de estudio en España, Italia y Suecia, y que ha demostrado aportar importantes beneficios al proceso del diseño de proyectos de rehabilitación energética [15].

La tesis que se desarrolla en estas páginas se ha realizado como compendio de publicaciones, donde la primera publicación presenta la metodología y el marco de evaluación desarrollado como inicio a la investigación y validado en el barrio de Cuatro de Marzo. La segunda de las publicaciones presenta la herramienta que se ha desarrollado, integrando la evolución del sistema de evaluación, así como su validación en un caso simplificado que permitió verificar su funcionamiento y servir de base a su mejora. La tercera publicación presenta la validación del sistema de evaluación de nuevo sobre Cuatro de Marzo, sobre un espectro mucho más amplio de escenarios y bajo la automatización del proceso de generación de los escenarios candidatos para la rehabilitación, permitiendo validar su robustez e idoneidad para ser integrado en el proceso de diseño de proyectos de rehabilitación energética.

Además de las publicaciones que componen el núcleo de esta tesis, en las últimas páginas se presentan otras publicaciones complementarias que han permitido adquirir y desarrollar conocimientos adicionales necesarios para la consecución de los objetivos establecidos dentro de este trabajo de investigación.

# INVESTIGACIÓN. OBJETIVOS, METODOLOGÍA E HIPÓTESIS





## **2 Investigación. Objetivos, metodología e hipótesis**

La investigación llevada a cabo se articula en torno a tres objetivos en el marco del tema propuesto, y a través de la realización de trabajos con soporte en diversos proyectos de investigación y demostración con resultados reales en el ámbito de la rehabilitación energética.

La metodología para la consecución de estos objetivos (según aparecen listados en la sección de Objetivos) plantea el desarrollo de un modelo de evaluación multi-criterio de alternativas de diseño para rehabilitación de edificios a escala de barrio y la validación de la misma en varios casos, así como su integración en un proceso automatizado de generación de esas alternativas. Estos trabajos se enmarcan principalmente en un proyecto de investigación internacional en el que el doctorando (coordinador del proyecto) ha trabajado con un equipo multi-disciplinar en los ámbitos de la simulación energética, la integración y el mapeo de datos, el cálculo de indicadores en varios ejes (energético, confort, económicos, etc.) o procesos de optimización. Estos desarrollos, con base en trabajos previos desarrollados en el marco de otros proyectos de investigación (como aparece listado en la sección de Medios) son la base de la metodología de trabajo para el desarrollo de esta tesis doctoral.

Como resultado de esta investigación se han publicado tres artículos que, en su conjunto, presentan la innovación y progreso más allá del estado del arte en el ámbito de los procesos de toma de decisiones y del diseño de proyectos de rehabilitación a escala de barrio.

### **2.1 Justificación**

En la Unión Europea existen cerca de 160 millones de edificios, siendo el consumo de energía primaria del sector residencial en torno al 26,20% del global en los 28 países que la integran. Así, con un parque residencial edificado muy amplio, y con una tasa anual de rehabilitación muy baja (en torno al 1% del parque existente), mejorar el uso de la energía en los edificios existentes se convierte en una línea prioritaria para acercarse lo máximo posible a

los objetivos energéticos en el horizonte de 2030 y de descarbonización de los edificios que se ha marcado la UE para 2050.

Así, mientras que para nueva edificación el concepto de Edificios de Energía Casi Nula resulta más evidente y relativamente sencillo de conseguir, en el ámbito de la rehabilitación no es tan inmediato implementar las medidas necesarias a nivel de edificio (reducción de la demanda, mejora de la eficiencia energética de los sistemas, producción a partir de fuentes renovables y herramientas de gestión de la energía consumida y producida).

Por tanto, como alternativa se debe pensar en medidas integradas que involucren a conjuntos de edificios, apareciendo así el concepto de Distritos de Energía Casi Nula. De esta manera, el distrito se considera como una unidad energética única, donde el balance ponderado de energía consumida y energía exportada debe aproximarse a un balance nulo o casi nulo en términos bien de energía o de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Planteando la rehabilitación de edificios desde un punto de vista de distrito, el abanico de soluciones, especialmente para integración de medidas activas de generación de energía, es mucho mayor. De la misma manera, aparecen modelos de negocio y facilitadores asociados (como es el caso de las Empresas de Servicios Energéticos) que permiten establecer estrategias bancables y más atractivas a los usuarios y los promotores. Todo ello acompañado necesariamente de la participación de las entidades públicas mediante políticas de regeneración urbana.

Existe, por tanto, una clara oportunidad en el sector de la rehabilitación energética de edificios a escala de barrio. Sin embargo, también las barreras asociadas a este cambio de escala difieren de los enfoques que consideran los edificios de manera individual. Estas barreras abarcan aspectos sociales o normativos, como los constantes cambios en la regulación; económicos, como la necesidad de inversión inicial; o técnicos, como el desconocimiento sobre ciertas medidas de ahorro de la energía y su comportamiento. La Tabla 1 muestra un análisis de estas principales barreras en los ámbitos mencionados.

Además a estos aspectos se unen los relacionados con cualquier proceso realizado con la edificación como son la fragmentación de la cadena de valor, con agentes que aparecen en diferentes fases y con intereses no alineados, o la existencia de numerosas herramientas carentes de interoperabilidad entre ellas y que resultan en la necesidad de llevar a cabo múltiples modelos de información con el tiempo y la probabilidad de error que ello conlleva. Otra de las barreras que también dificulta el despliegue de proyectos de rehabilitación

energética es la falta de información contrastada, lo que complejiza las tareas de concienciación no solo hacia el usuario final sino también hacia otros agentes facilitadores como las entidades de inversión.

Con estas consideraciones, existe un hueco en la cadena de valor para el desarrollo de nuevos elementos que permitan mejorar el proceso en su conjunto a través de integrar elementos que aseguren: (1) la colaboración entre los agentes, (2) la interoperabilidad entre las herramientas que emplean y (3) la reducción de tiempos y errores resultando en ahorros económicos y la mejora de la imagen que existe en torno al sector de la rehabilitación energética.

**Tabla 1.** Barreras asociadas a los procesos de rehabilitación energética.

<b>Financieras</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Proceso</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costes de la rehabilitación</li> <li>• Acceso a la financiación</li> <li>• Bajos precios de la energía</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de conocimiento sobre algunas soluciones por parte de los profesionales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fragmentación de la cadena de valor</li> <li>• Escasa colaboración entre los agentes involucrados en el proceso</li> </ul>
<b>Regulatorias</b>	<b>Concienciación</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variedad de ambición respecto al comportamiento energético</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de concienciación sobre la necesidad de la rehabilitación energética</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de interoperabilidad entre herramientas</li> <li>• Falta de credibilidad en los ahorros energéticos</li> </ul>

En la búsqueda de respuesta a estos retos se encuentran los proyectos de investigación que sirven de base a esta tesis doctoral, cuyo principal objetivo ha sido el desarrollo de una metodología y posteriormente su transformación en una herramienta que captura y automatiza algunos de los procesos del diseño de proyectos de rehabilitación energética a escala de barrio. Así, esta metodología y la herramienta integran servicios que fomentan la colaboración entre los agentes del proceso de rehabilitación, ofrecen un marco de interoperabilidad entre herramientas de simulación y optimización de escenarios logrando reducir los tiempos y errores asociados al proceso.

## 2.2 Objetivos

### 2.2.1 Objetivos generales

El desarrollo de la metodología y la herramienta mencionadas en la sección anterior se han llevado a cabo a través del diseño, desarrollo, despliegue e integración de cada uno de los elementos que permiten capturar los procesos que se han integrado. Uno de estos elementos, objeto de esta tesis doctoral, ha sido el sistema de evaluación de los diferentes escenarios de rehabilitación. Así, la presente tesis se centra en la consecución de tres objetivos generales que han permitido desarrollar y validar este sistema de evaluación:

1. Desarrollo de una metodología de evaluación de alternativas de rehabilitación energética de barrios a través de cálculo de indicadores y un sistema de ponderación multi-criterio dinámico basado en estrategias colaborativas.
2. Validación y testeo de la metodología de evaluación en casos de estudio donde se hayan llevado a cabo rehabilitaciones energéticas.
3. Integración de la metodología de evaluación junto con un sistema automático de generación de escenarios de rehabilitación energética basado en un catálogo de tecnologías de rehabilitación en los ámbitos de sistemas pasivos, activos, sistemas de energías renovables y estrategias de control.

### 2.2.2 Objetivos específicos

A partir de los objetivos generales anteriores, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. **Objetivo 1:** Desarrollo de una metodología de evaluación de alternativas de rehabilitación energética de barrios a través de cálculo de indicadores y un sistema de ponderación multi-criterio dinámico basado en estrategias colaborativas:
  - 1.1. **Sub-objetivo 1.1:** Analizar los indicadores existentes que permiten guiar el proceso de diseño de proyectos de rehabilitación energética de áreas urbanas residenciales.
  - 1.2. **Sub-objetivo 1.2:** Identificar técnicas de soporte a la toma de decisiones basada en estrategias multi-criterio y su potencial aplicación al objeto de la investigación.

- 1.3. **Sub-objetivo 1.3:** Generar un marco de evaluación basado en la integración de una selección de indicadores y un sistema de priorización multi-criterio que se adecúe a las necesidades del ámbito de aplicación.
2. **Objetivo 2:** Validación y testeo de la metodología de evaluación en casos de estudio donde se hayan llevado a cabo rehabilitaciones energéticas:
  - 2.1. **Sub-objetivo 2.1:** Validar el marco de evaluación a través de la generación de escenarios de rehabilitación energética y su comparación para un caso donde se haya llevado a cabo una rehabilitación energética.
  - 2.2. **Sub-objetivo 2.2:** Recopilar las potenciales mejoras y revisar el marco de evaluación generando una nueva versión que se adapte a las necesidades del proceso.
3. **Objetivo 3:** Integración de la metodología de evaluación junto con un sistema automático de generación de escenarios de rehabilitación energética basado en un catálogo de tecnologías de rehabilitación en los ámbitos de sistemas pasivos, activos, sistemas de energías renovables y estrategias de control:
  - 3.1. **Sub-objetivo 3.1:** Automatizar e integrar el cálculo y evaluación de indicadores, así como la generación de escenarios alternativos de rehabilitación energética.
  - 3.2. **Sub-objetivo 3.2:** Validar el sistema de evaluación en un caso real donde se haya llevado a cabo una rehabilitación energética con objeto de validar los resultados obtenidos.

## 2.3 Medios y recursos

Como se menciona anteriormente, el trabajo propuesto se enmarca en el ámbito de dos proyectos de investigación financiados por la Comisión Europea bajo el Séptimo y Octavo (H2020) Programas Marco de Investigación y Desarrollo:

1. Residential Renovation towards nearly zero energy CITIES – R2CITIES (FP7, no. de contrato: 314473, [www.r2cities.eu](http://www.r2cities.eu)): el proyecto ha desarrollado una metodología de rehabilitación de barrios con conceptos de energía casi nula, centrándose en edificios residenciales. Esta metodología, que considera la evaluación basada en un sistema de indicadores en varios ámbitos (energía, confort, económico, etc.) emplea un esquema de ponderación estático basado en los criterios de varios expertos que contribuyeron al desarrollo de la metodología, y se ha testado para la rehabilitación energética de tres

barrios residenciales: Cuatro de Marzo (en Valladolid, España), Lavatricci (en Génova, Italia) y Yacacik (en Kartal-Istanbul, Turquía).

2. Optimised Energy Efficient Design Platform for Refurbishment at District Level – OptEEmAL (H2020, no. de contrato: 680676, [www.opteemal-project.eu](http://www.opteemal-project.eu)): el proyecto ha desarrollado una herramienta software que captura y automatiza los procesos de la metodología de rehabilitación desarrollada en el marco del proyecto R2CITIES, introduciendo como principales ámbitos de innovación: el enfoque de proyecto colaborativo a través de estrategias tipo *Integrated Project Delivery* (IPD), la generación automática de modelos de simulación y escenarios de rehabilitación utilizando como entrada archivos tipo *Building Information Modelling* (BIM) y otras fuentes de información, y la evaluación automática de estas alternativas mediante un sistema dinámico de ponderación de indicadores que considera una estrategia multi-criterio de comparación por pares.

Además de estos dos proyectos cabe destacar otros dos que a pesar de no pertenecer al núcleo de las actividades desarrolladas en la presente tesis, han permitido al doctorando complementar la investigación sobre los temas que en ella se abordan. Estos son:

3. Efficient Energy for EU Cultural Heritage – 3EnCult (FP7, no. de contrato: 260162, [www.3encult.eu](http://www.3encult.eu)): este proyecto trabajó en el desarrollo de estrategias para la rehabilitación energética de edificios pertenecientes al patrimonio histórico, trabajando por tanto las particularidades que ello conlleva. Dentro de sus actividades, se planteó una metodología para integrar los principales procesos de la rehabilitación, aplicada en la Escuela de Ingenieros Industriales de Béjar.
4. Building as a Service (Ecosystem) – BaaS (FP7, no. de contrato: 288409, [www.baas-project.eu](http://www.baas-project.eu)): el objetivo de BaaS fue el de desarrollar una plataforma que permitiese optimizar el control de los sistemas de energía de edificios existentes, basándose en procesos de interoperabilidad entre modelos BIM y herramientas de simulación y optimización. Estos desarrollos fueron la base del posterior diseño y despliegue del marco de interoperabilidad del proyecto OptEEmAL, lo que supuso el origen para la integración de la automatización del intercambio de datos para el proceso de evaluación de las alternativas de rehabilitación energética.

Estos proyectos de investigación y los medios de los que los mismos disponen han supuesto la principal base para el desarrollo de esta tesis, así como la colaboración con el GIR

Arquitectura y Energía y con el Departamento de Construcción de la ETSAVA, donde el doctorando ha estado impartiendo docencia en los ámbitos de las instalaciones y el acondicionamiento eficiente.

## 2.4 Metodología

La presente tesis doctoral se ha desarrollado a través de una metodología en 7 fases que se alinea con los objetivos establecidos y los elementos necesarios para la consecución de los mismos. Esta metodología aparece reflejada en la Figura 3, mientras que las secciones a continuación detallan la implementación de cada una de las fases.

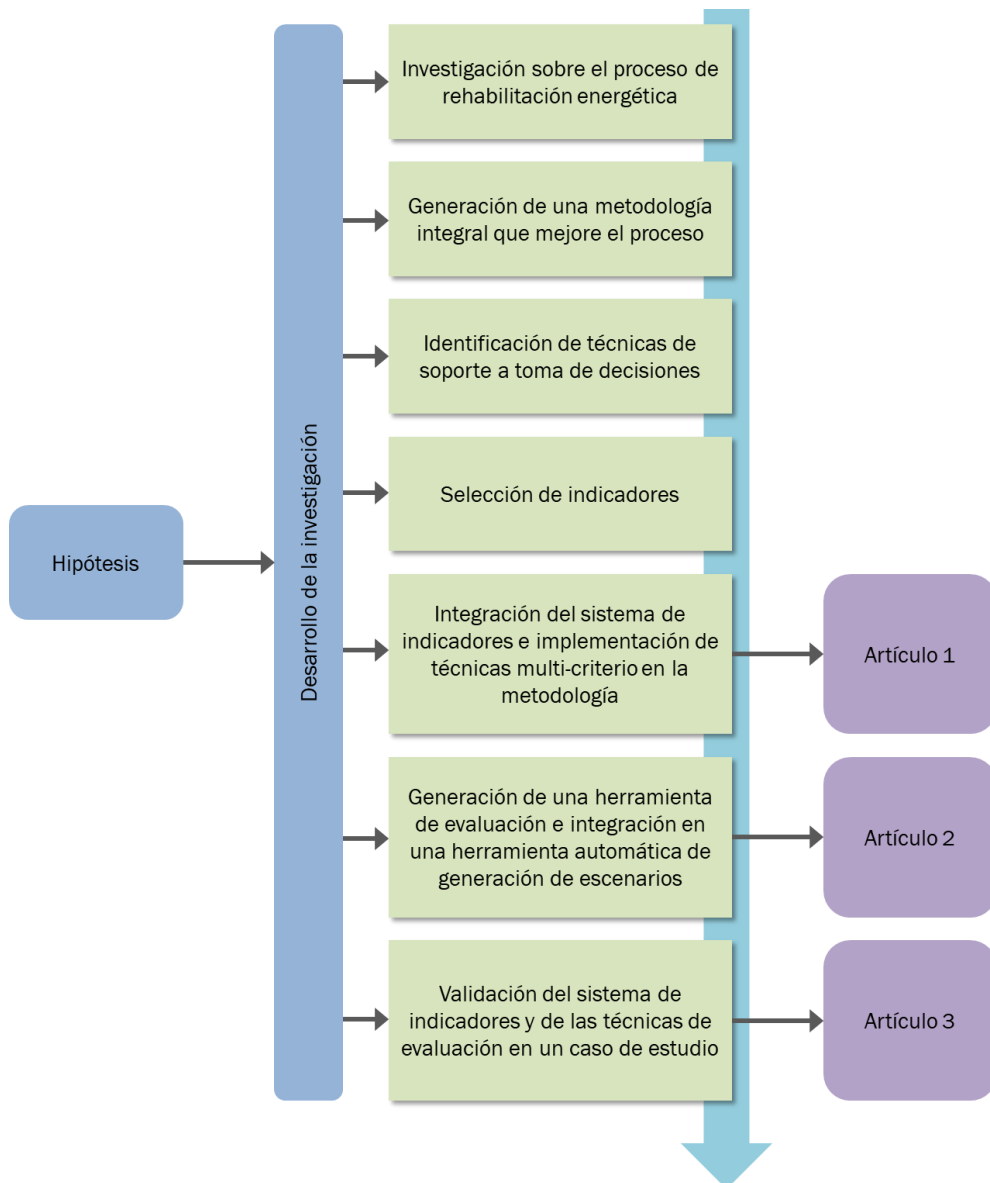


Figura 3. Metodología general de la investigación.



### 2.4.1 Investigación sobre el proceso de rehabilitación energética

El concepto de renovación urbana surgió a mediados del siglo pasado como conclusión a los Congresos Internacionales de Arquitectura Moderna. Como resultado de los postulados de la crisis del crecimiento indefinido se comenzó a repensar el concepto del proyecto de “la nueva ciudad” y se reemplazó por el proyecto de “la ciudad existente”.

En principio este término aplicaba fundamentalmente a la recuperación de edificios históricos pero más tarde se extendió al resto del tejido urbano existente, incluyendo edificios residenciales, barrios, etc. En una búsqueda de validar la recuperación de los centros históricos como conjunto, se comenzó a evaluar las transformaciones o degradaciones morfológicas, funcionales o sociales que la ciudad histórica había sufrido.

La necesidad de afrontar una intervención más allá de la restauración física de edificios históricos y del ambiente urbano permitió generar una nueva teoría de la renovación que se enfocaba en la ciudad existente. Además de la idea de la preservación histórica aparecieron otras razones sociales como el deterioro de las clases sociales que los habitaban: envejecimiento, rentas bajas, bajas actividades productivas, etc. Esto representó el desgaste de las infraestructuras urbanas y la necesidad inminente de construir nuevos desarrollos urbanos en los suburbios de la ciudad. Así, la falta de metodologías y tecnologías que facilitasen el mantenimiento de la vieja “nueva ciudad”, el parque edificado comenzó a deteriorarse rápidamente.

Más tarde apareció también el aspecto de la sostenibilidad integrando elementos ambientales y socioeconómicos e, indudablemente, comenzando a considerar aspectos como la energía, movilidad y emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.

Por lo tanto, podemos considerar la rehabilitación urbana como:

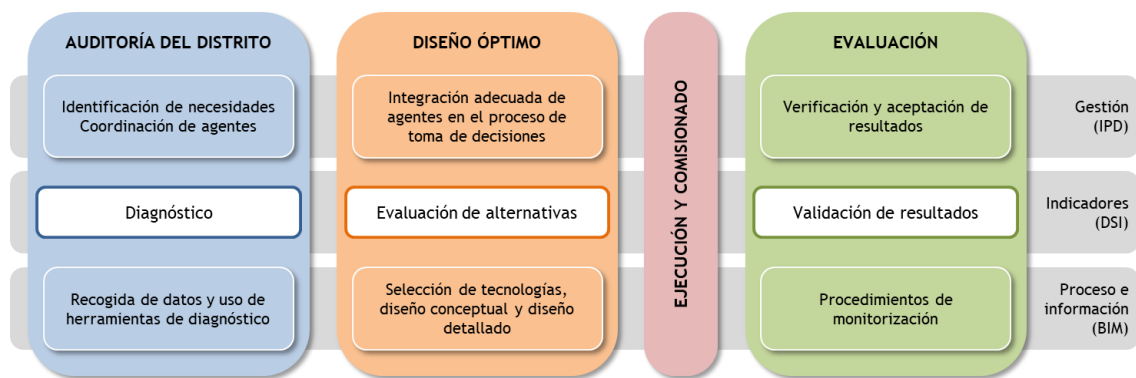
*“La rehabilitación urbana comienza con un diagnóstico multidisciplinar que permite conocer el barrio y va más allá de los edificios, las infraestructuras o los espacios públicos, para involucrar a los diferentes actores y habitantes. Es en esta sólida base donde los agentes políticos toman decisiones que dirigen la gestión urbana, instrumentos legales y recursos económicos necesarios. En resumen, el objetivo de la revitalización de áreas degradadas es la implementación de estrategias de regeneración que permitan detener el deterioro de las estructuras urbanas y sociales, preservando los valores patrimoniales, reforzando la cohesión social y promoviendo la actividad económica” [16].*

Bajo estas premisas se comenzó a trabajar en el desarrollo de un marco metodológico holístico e integral de rehabilitación urbana a nivel de distrito dentro del proyecto R2CITIES. Este marco permite integrar a todos los agentes involucrados en el proceso y les dota de herramientas y mecanismos para llevar a cabo una toma de decisiones más informada durante las diferentes fases.

Además, esta metodología busca mejorar el proceso de la rehabilitación entendiendo que las principales barreras para estimular el sector de la rehabilitación energética no son tecnológicas. Sí que es cierto que todavía existe margen de mejora en las tecnologías existentes y nuevas soluciones que pueden adaptarse en mejor medida a las necesidades del mercado. Pero las mayores barreras en relación con las tecnologías se encuentran en el conocimiento y la accesibilidad a las mismas: la falta de conocimiento acerca del comportamiento de algunas soluciones y los beneficios asociados, las especificaciones ambiguas o los elevados costes son todavía elementos que bloquean el potencial existente en la rehabilitación energética del parque edificado. Sin embargo, a pesar de la necesidad de continuar trabajando en el ámbito tecnológico, “el principal problema de la rehabilitación se encuentra en la gestión: económica, social y administrativa” [17].

Así, para dar el salto de los edificios eficientes a los distritos eficientes, es necesario un cambio de escenario que establezca un marco más horizontal integrando los componentes tecnológicos con los aspectos legales, sociales, políticos y económicos que son inherentes a la ciudad.

Los enfoques multidisciplinarios son esenciales en este cambio de paradigma de manera que se involucren a todos los agentes que pertenecen a la cadena de valor del proceso de rehabilitación energética. Una cadena de valor que comprende la fase de diagnóstico para identificar las necesidades y oportunidades del entorno urbano, la fase de diseño de las soluciones tecnológicas que se adaptan a esas necesidades, la fase de construcción para garantizar la aplicación correcta de las soluciones y la gestión de los recursos y, finalmente, la fase de operación y mantenimiento para facilitar la gestión de las infraestructuras así como verificar el cumplimiento de los objetivos establecidos y garantizar el comportamiento energético, de confort o económico esperado. En este sentido, la necesidad de decisiones clave, nuevos instrumentos legales, recursos de financiación y gestión urbana deben articularse de manera apropiada y coordinada.



**Figura 4.** Marco metodológico de rehabilitación energética.

De hecho, mano a mano con el desarrollo tecnológico se deben implementar iniciativas dirigidas por la administración en el ámbito de la planificación urbana y la legislación del mercado de la construcción para redirigir la situación a las necesidades reales del parque edificado y garantizar que nuevos instrumentos como modelos de negocio o procesos administrativos pueden desplegarse adecuadamente.

De esta manera, la metodología desarrollada por el proyecto R2CITIES, detallada en la sección siguiente y que es objeto del primero de los artículos de esta tesis doctoral, busca integrar todos estos componentes para garantizar el acceso a herramientas y métodos que permitan una mejor toma de decisiones integrando a los actores que forman parte del proceso. Esta toma de decisiones se basa en una selección de indicadores que permiten caracterizar el estado previo a la rehabilitación y compararlo con diferentes escenarios de rehabilitación. Para reflejar los intereses de los agentes de la rehabilitación, el esquema de indicadores se pondera y agrega considerando las prioridades de los actores que componen la cadena de valor. Para ello se han implementado técnicas de toma de decisiones multi-criterio que traducen los criterios subjetivos en pesos específicos para ponderar los indicadores que conforman el esquema de evaluación.

#### **2.4.2 Generación de una metodología integral que mejore el proceso de la rehabilitación energética a escala de distritos**

Los distritos se pueden considerar como un sistema de interconexiones, interacciones, relaciones y flujos complejos. De esta manera, un enfoque integral es esencial para una toma de decisiones más efectiva en relación con mejora de la eficiencia energética. A la hora de abordar procesos de rehabilitación energética en distritos el conjunto de posibilidades para integrar tecnologías hipocarbónicas es mayor al considerar el grupo de edificios como una entidad energética única. En este sentido, el contorno para el análisis debe considerar todas las sub-

entidades (edificios) que demandan una cierta cantidad de energía para dotarlos de determinados servicios (condiciones de confort en función del uso de los espacios) y todos los elementos de generación energética (tanto renovable como no renovable) junto con los sistemas de distribución, unidades terminales y estrategias de control. Para permitir una correcta evaluación y toma de decisiones sobre el proyecto de rehabilitación energética es necesario que cada elemento o sub-entidad se evalúe como parte de un conjunto, considerando especialmente los efectos interactivos entre las diferentes tecnologías.

Como se detalla anteriormente, el proyecto europeo R2CITIES tenía como objetivo el desarrollo y validación de una metodología global y científica de rehabilitación energética que facilite implementar soluciones a escala de distrito. Dicha metodología consta de cinco fases, que son (I) auditoría de distrito, (II) evaluación y diseño de soluciones y negociación con los implicados, (III) ejecución, seguimiento y puesta en marcha, (IV) operación y mantenimiento, y (V) evaluación de los ahorros energéticos y plan de aceptación, y se apoya en el empleo de indicadores de sostenibilidad que permiten evaluar el comportamiento energético, las condiciones de confort y diferentes aspectos ambientales, sociales, económicos y urbanos.

El fin es optimizar la solución final y alcanzar elevados ratios de mejora del comportamiento energético con unos costes razonables y compatibles con diferentes modelos de financiación.

La característica fundamental de repetitividad de esta metodología no persigue la reproducción sistemática de las medidas de eficiencia energética implementadas, sino la réplica de los instrumentos que permiten diagnosticar, proponer, seleccionar y evaluar las combinaciones de distintas soluciones de eficiencia energética.

R2CITIES plantea una herramienta metodológica exhaustiva basada en una serie de indicadores objetivos que permiten evaluar, en cada fase, tanto el estado del distrito -en los ámbitos energético, de confort, ambiental, económico, social y urbano- como las alternativas de intervención, así como hacer el seguimiento de la ejecución de los trabajos y cuantificar los ahorros energéticos y la mejora de las condiciones de confort.

Dado el gran potencial de ahorro energético y de mejora de las condiciones de confort, junto con la gran homogeneidad tipológica y constructiva que presentan ciertos conjuntos de edificios construidos bajo proyecto único en la segunda mitad del siglo pasado, se plantea el salto del edificio al distrito con objeto aplicar medidas escalables, reduciendo así tiempo y

coste, así como la integración de diversas medidas de ahorro fácilmente replicables en el conjunto del distrito.

Esta herramienta metodológica propone la implementación del método IPD (*Integrated Project Delivery*), a la vez que se apoya en un instrumento que permite centralizar la información y dar soporte a todos los actores involucrados en el proceso, así como a las diferentes herramientas auxiliares, el BIM (*Building Information Modelling*).

#### **2.4.2.1 Fase I – Auditoría de distrito: indicadores de estado, presión y respuesta**

La metodología comienza con el diagnóstico del estado actual del distrito, cuantificando parámetros clave por medio de la recogida de datos de facturación de los vecinos y de sus hábitos de uso de los sistemas energéticos, para construir los perfiles de consumo de las viviendas.

Por otro lado, las simulaciones energéticas permiten obtener la demanda energética, parámetro no directamente cuantificable. Para verificar su precisión, ésta ha de ser validada con los perfiles de consumo medidos en la realidad así como a través de ensayos no destructivos que permitan recoger parámetros adicionales del comportamiento real para la validación de los modelos.

Posteriormente, finalizada la auditoría del distrito, han de definirse los objetivos a alcanzar por medio de la intervención (en términos de ahorros energéticos, económicos, mejora de las condiciones de confort, etc.), así como los condicionantes derivados de las barreras identificadas (limitación de costes, condicionantes técnicos, sociales, etc.)

#### **2.4.2.2 Fase II – Evaluación y diseño de las soluciones y negociación**

La segunda fase plantea el diseño de soluciones por medio de la consideración de diversas tecnologías de eficiencia energética (pasivas, activas, de generación renovable o de gestión de los sistemas), viables desde el punto de vista técnico, que permiten mejorar el comportamiento energético y las condiciones de confort de los edificios del distrito.

En esta fase es clave el análisis de la interacción que cada tecnología tiene sobre las demás, ya que las implicaciones sobre los ahorros o los costes de las tecnologías combinadas no se pueden evaluar de forma individual. Al analizar la combinación de medidas activas y pasivas, el retorno de las inversiones se equilibra de forma que los diferentes modelos de inversión

pueden responder a una intervención de esta envergadura, algo que no ocurre cuando se aplican las medidas pasivas de forma independiente.

De forma paralela, se desarrolla un proceso de negociación donde se verifica que las demandas y necesidades de los clientes, planteadas en la primera fase, se cumplen, al mismo tiempo que se garantizan unos costes asumibles bajo el modelo financiero planteado, considerando no sólo la inversión inicial, sino los beneficios a corto, medio y largo plazo.

### **2.4.2.3 Fases III-V – Ejecución de los trabajos, operación y mantenimiento y evaluación de ahorros**

Las tres últimas fases de la metodología contemplan la ejecución de los trabajos de rehabilitación, la operación y mantenimiento de los edificios, la evaluación de los ahorros energéticos obtenidos por medio de un protocolo de Medida y Verificación.

Resulta de vital importancia que en estas fases se mantenga el mismo discurso metodológico, en coherencia con las fases anteriores y empleando las herramientas establecidas en este marco, de forma que recursos como el BIM permitan asistir a las fases de ejecución y de operación y mantenimiento, así como seguir empleando los indicadores de sostenibilidad establecidos desde la primera fase.

### **2.4.3 Selección de indicadores**

La definición de los indicadores que permiten construir el esquema de evaluación es un elemento clave para poder comparar las alternativas de diseño del proyecto de rehabilitación. Estos indicadores se refieren a los tipos de datos que se miden o estiman en relación a un contorno de medida para cuantificar aspectos como el comportamiento energético, las condiciones de confort, aspectos económicos o de índole social o urbana. El empleo de estos indicadores adquiere una gran relevancia ya que la implementación de un valor medible permite elegir entre las diferentes alternativas de una manera más informada. Además, estos valores también permiten establecer objetivos para algunos de los criterios sobre los que desea actuar como la demanda energética o la inversión. En consecuencia, los objetivos de eficiencia energética y de sostenibilidad del distrito se pueden gestionar de manera integral y evaluar frente a directivas o requerimientos regulatorios, sociales o económicos existentes.

El sistema de evaluación desplegado en la presente tesis doctoral se basa en un sistema de indicadores que también ofrece dos versiones: una primera integrada por 41 indicadores categorizados en índices energético (11), económico (11), confort (8), social (2), ambiental (5) y

urbano (4) y agregados en un índice de sostenibilidad del distrito, y una segunda versión con 18 indicadores agregados en una función de coste que integra los ambientales (3) y económicos (3) y una función de beneficio en dos niveles que aglutina los energéticos (11) y de confort (1).

La metodología empleada para la selección de indicadores se ha basado en una generación preliminar de un listado exhaustivo que se planteó en el primer esquema y un proceso de depuración basado en las validaciones llevadas a cabo para asegurar que los indicadores empleados ofrecían las condiciones de imparcialidad y fiabilidad requeridas.

Para la primera lista de indicadores se emplearon algunas referencias entre las que se encuentran las siguientes:

- Estándar internacional “ISO 37120:2014 Sustainable Development of Communities – Indicators for city services and quality of life” que fue el primer estándar internacional para ciudades. Su principal objetivo era establecer un conjunto de indicadores para evaluar y monitorizar el comportamiento de la ciudad en términos de desarrollo sostenible y resiliencia.
- Comité Técnico “ISO TC 268/WG2 – Sustainable Development of Communities – Inventory and Review of existing frameworks on sustainable development and resilience in cities” que se empleó para complementar la lista la ISO 37120.
- Proyectos europeos:
  - CONCERTO PREMIUM and SCIS (“Smart Cities Information System”) Initiatives: se tratan de dos iniciativas financiadas por la Comisión Europea para la generación de una base de datos con información sobre el comportamiento de proyectos relacionados con los ámbitos de actuación de las Ciudades Inteligentes, entre los que se encuentran el eje de la rehabilitación energética. Además, han desarrollado guías sobre el sistema de indicadores que emplean y sus métodos de cálculo para establecer un conjunto estandarizado de datos.
  - CITIKEYS Project (“Indicators for Smart City Projects and Smart Cities): este proyecto, también financiado por la Comisión Europea, desarrolló un sistema de indicadores para la evaluación de estrategias de transformación urbana, generando además herramientas para la recogida de los datos y estableciendo recomendaciones en base a la información recogida.

- FASUDIR Project (“Friendly and Affordable Sustainable Urban Districts Retrofitting”): este proyecto desarrolló una herramienta integrada de soporte a la toma de decisiones para dar soporte a los encargados de la toma de decisiones para seleccionar la mejor estrategia de rehabilitación para incrementar la sostenibilidad del distrito. A diferencia de los planteamientos de esta tesis doctoral, este sistema de evaluación no integra mecanismos para la generación de sistemas de ponderación de los indicadores basados en los criterios de priorización de los agentes involucrados en el proceso.

Una vez generado ese primer listado de indicadores se llevó a cabo un trabajo de depuración basado en una validación continuada tanto por los agentes involucrados en el proceso así como por parte de los expertos en el cálculo de los indicadores con objeto de garantizar que los valores obtenidos permitían generar un juicio fiable.

#### **2.4.4 Integración del sistema de indicadores e implementación de técnicas multi-criterio**

Es posible implementar métodos de Análisis Multicriterio para construir un juicio integral del comportamiento de los edificios bajo cada potencial escenario de rehabilitación a través del análisis de ciertos criterios de evaluación [18]. A través de la aplicación de un método de ponderación se puede lograr implementar una evaluación que se adecúe a las prioridades establecidas en cada tipo de proyecto. Sin embargo, a pesar de que existen varias referencias acerca de estos métodos, no existe suficiente guía sobre el método de agregación a emplear. Además, la aplicación de esquemas de ponderación viene generalmente acompañada de problemas que resolver [19]. Así, es necesario profundizar en los retos y decisiones necesarias para aplicar un método que se ajuste a las necesidades del problema a resolver. Algunos de estos elementos son:

- **Definición del encargado de la toma de decisiones.** Este es uno de los principales aspectos a ser definido en el proyecto: tanto los miembros del proceso de toma de decisiones como el proceso mediante el cual sus criterios son tenidos en cuenta tienen un gran impacto en los resultados del proyecto.
- **Definición de los criterios de evaluación.** Los métodos empleados para medir el comportamiento de una estrategia de rehabilitación (indicadores) deben ser lo suficientemente holísticos para cubrir un amplio rango de ámbitos y deben calcularse a



través de herramientas que impliquen el mínimo posible de consideraciones de manera que se ofrezcan resultados fiables e imparciales.

- **Normalización y escalado.** Una vez que los indicadores se han calculado, estos deben expresarse en unidades y escalas que permitan compararlos. Esta transformación no es trivial e introduce cierta subjetividad en el proceso especialmente si se aplican técnicas basadas en normalización máximo-mínimo, donde una escasa población de valores sobre los que construir la ecuación de normalización puede derivar en valores fuera de rango que se asimilan a un máximo o mínimo mientras que se encuentran por encima o debajo respectivamente.
- **Definición de objetivos y esquema de ponderación.** Establecer una relación entre los objetivos establecidos por los agentes del proceso de rehabilitación y relacionarlos con los criterios de evaluación (indicadores) adquiere una gran relevancia ya que se puede introducir una gran subjetividad en el proceso. De esta manera, es preciso establecer de manera adecuada la manera de identificar los pesos que cada indicador tiene sobre los demás.

En la metodología y herramienta que se presentan en la presente tesis doctoral se han implementado dos estrategias diferentes para la implementación de la estrategia de agregación: un esquema de ponderación estático basado en la agregación de los criterios en base a pesos establecidos mediante la consulta a un grupo de expertos, y un esquema de ponderación dinámico basado en la generación de una función multi-objetivo donde los pesos se pueden modificar para cada tipo de proyecto.

La primera aproximación (objeto del primer artículo), debe entenderse como una primera versión sobre la que se implementaron métodos más sofisticados resultantes de la validación de la metodología por un lado, y de la integración de la evaluación en una herramienta que automatiza ciertos procesos como la generación de escenarios o el cálculo de indicadores. Así, la segunda versión (objeto de los artículos segundo y tercero), ofrece una mayor flexibilidad en el proceso de toma de decisiones, así como menores imprecisiones en los procesos de normalización y escalado.

La siguiente sección detalla los procedimientos empleados para la generación de las estrategias de agregación de los dos enfoques.

## **2.4.5 Identificación de técnicas de soporte a la toma de decisiones**

En esta búsqueda de establecer los criterios que permitan trasladar la información subjetiva en criterios de priorización para la ponderación de indicadores se han implementado una serie de técnicas que sirven de soporte a la toma de decisiones, partiendo de una aproximación más sencilla y estática para evolucionar en un enfoque más completo y dinámico que otorga al proceso mayor flexibilidad y fiabilidad.

### **2.4.5.1 Generación de un esquema estático de ponderación de indicadores**

Como primera aproximación, el problema de seleccionar el escenario más adecuado para la rehabilitación energética en base a una serie de criterios se plantea a través de la formulación de una matriz de decisiones. En esta matriz cada alternativa (entendida como escenario de rehabilitación) se caracteriza a través de los valores normalizados y escalados de sus indicadores sobre los que se aplica un peso determinado que traslada el criterio subjetivo de los agentes del proceso a un valor cuantificable.

Así, el reto se encuentra en establecer la metodología para la obtención de esos pesos, para lo que (tal y como se describe en el primer artículo) se siguió una metodología basada en una adaptación del método Delphi de lógica difusa que se basa en la consulta a un panel de expertos que otorga, de manera anónima, un valor que refleja su opinión. Para ello se generaron unos cuestionarios que establecen 9 niveles de importancia que van desde “muy poco importante” hasta “muy importante” y que reflejan un número difuso triangular. Sobre estos números se aplica una técnica de convertir los números difusos triangulares en valores exactos que cuantifican el peso que se otorga al indicador evaluado.

El resultado de esta técnica ofrece los valores de los pesos de cada uno de los indicadores, en un esquema de ponderación que traduce la opinión de los expertos en un vector de los valores que priorizan unos indicadores sobre otros.

### **2.4.5.2 Generación de un esquema dinámico de ponderación de indicadores**

En un segundo estadio se generó una evolución de la aproximación que transforma la matriz de toma de decisiones en un problema de optimización que, de una manera más integrada, permite generar poblaciones de escenarios que se evalúan de acuerdo a la agregación de los indicadores permitiendo generar nuevas poblaciones hasta alcanzar aquellos escenarios que mejor se adecúan a los objetivos del proyecto. Esto requiere, por tanto, la transformación del esquema estático en un esquema de agregación dinámico que permita establecer las

importancias de los indicadores en cada nuevo proyecto y que genere una función de evaluación que sirva al proceso de optimización para comparar los escenarios y poder identificar aquellos que mejor se ajustan a los criterios establecidos.

La formulación de la función de evaluación adquiere, además, una gran importancia ya que debe evitar la introducción de subjetividades y dar soporte al problema de optimización en la evaluación de las alternativas de diseño.

Por otro lado, para la definición de los pesos otorgados a los criterios de evaluación, se modificó el método anterior para implementar un análisis jerárquico basado en la comparación por pares de los grupos de indicadores, lo que permite a los agentes establecer los criterios de priorización de una manera relativamente sencilla y que elimina ciertas incertidumbres asociadas al procedimiento anterior.

#### **2.4.5.3 Generación de una función bi-objetivo**

Una primera aproximación a la generación de esta función es el establecimiento de una función bi-objetivo, que generalmente se ajusta a los procesos de optimización centrados en la comparación de dos indicadores que normalmente entran en conflicto (por ejemplo, el escenario más económico no implica la reducción de consumo energético más alta).

El resultado de la función bi-objetivo es un frente de Pareto donde se busca la maximización o minimización de las funciones objetivo  $D(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})]$ .

Sin embargo, en el caso que nos ocupa, el establecimiento directo de una función bi-objetivo no permite dar respuesta al problema de optimización planteado, donde es necesario integrar múltiples criterios para la comparación de las alternativas de diseño.

#### **2.4.5.4 Generación de una función global multi-objetivo**

Por otro lado, la optimización multi-criterio o multi-objetivo se puede definir como aquella que permite encontrar el vector de solución de las variables de decisión que satisface las condiciones de contorno establecidas para los indicadores y que optimiza el vector de la función cuyos elementos representan las funciones objetivo individuales.

Formalmente el problema se define como el que permite encontrar el vector solución que optimiza el vector  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  del comportamiento del distrito:

$$D(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T$$

En otras palabras, el objetivo es establecer entre el conjunto de alternativas de diseño del proyecto de rehabilitación aquella que permite obtener los valores óptimos de la ecuación.

Existe además otra opción para generar esta función global multi-objetivo que resulta de la combinación de una estrategia de agregación ponderada de indicadores (similar a la establecida en la primera aproximación de la metodología) y la función bi-objetivo de manera que se puede formular el problema de optimización como una función coste-beneficio (bi-objetivo) que busca minimizar el coste y maximizar el beneficio. Dentro de esta función, el coste y el beneficio se formulan como la agregación ponderada de los indicadores que suponen un coste (no solo económico, sino también ambiental) y aquellos que suponen un beneficio (energético o de confort).

#### 2.4.6 Generación de una herramienta del sistema de evaluación e integración en una herramienta automática de generación de escenarios

En este contexto, y con todas las consideraciones anteriores, el objetivo del proyecto OptEEmAL fue el de generar una herramienta que permita integrar este proceso de evaluación así como otros procesos que pertenecen al proceso de diseño de proyectos de rehabilitación de barrios para permitir la toma de decisiones más informada y reducir los tiempos y errores asociados al proceso (Figura 5).

En términos generales, la herramienta captura la parte de la metodología descrita en la sección 2.4.1 centrada en las fases de diagnóstico y diseño, y automatiza procesos como la generación de modelos de simulación que permiten llevar a cabo el diagnóstico del barrio objeto de estudio, la generación de las alternativas de diseño, o el cálculo de los indicadores para cada uno de ellos.

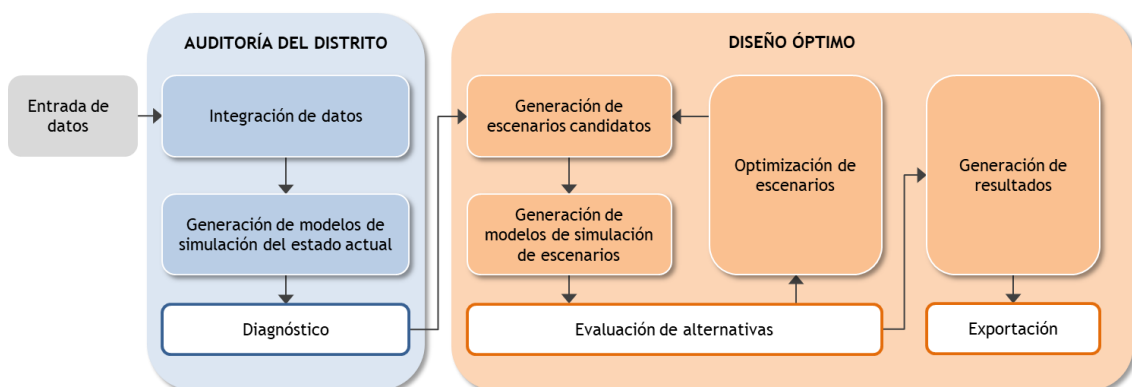


Figura 5. Esquema metodológico del proceso integrado en la herramienta OptEEmAL.

Así, la herramienta genera un marco de interoperabilidad y estrategias de colaboración entre los agentes para mejorar el proceso de diseño de proyectos de rehabilitación energética y permitiendo evaluar el distrito como una entidad única, considerando sus interacciones, interconexiones y flujos.

Para lograr este objetivo, la herramienta integra 5 pasos que se corresponden con las fases de diagnóstico y diseño.

La primera fase permite al usuario de la herramienta introducir la información necesaria para caracterizar el distrito incluyendo información geométrica, información sobre los sistemas de energía, condiciones de contorno u objetivos esperados. Además, en esta fase se introducen también los criterios de priorización para los criterios de evaluación, de manera que el usuario de la herramienta es guiado a través de un proceso de comparación por pares de los indicadores que posteriormente se traducen en los pesos otorgados a cada uno de ellos. Esta aproximación permite que el esquema de ponderación sea específico a cada proyecto.

La segunda fase integra todos los datos aportados por el usuario y genera los modelos de simulación de la situación inicial, los cuales permiten el cálculo de los indicadores que caracterizan la situación previa a la rehabilitación. La generación de los modelos de simulación es automática y utiliza un modelo de datos común que permite eliminar incertidumbres en el proceso que, de manera manual, puede derivar en errores al introducir inconsistencias entre los distintos modelos. Así, como resultado de este paso, se genera un vector de indicadores que caracterizan la línea base.

El tercer paso se corresponde con la generación de los escenarios candidatos de rehabilitación energética para lo que se combinan Medidas de Ahorro de Energía que se encuentran almacenadas en un catálogo desarrollado a tal fin. Estas medidas, que contemplan soluciones pasivas para reducir la demanda, activas y de renovables para reducir el consumo de fuentes fósiles, y medidas de control, se mapean en el modelo del distrito generando las diferentes instancias que se corresponden a cada posible escenario candidato de rehabilitación. Para la generación de estos escenarios se consideran las condiciones de contorno establecidas por los usuarios (en cuanto a barreras en la implementación de ciertas soluciones), así como una serie de reglas de combinación entre ellas.

El cuarto paso, que trabaja de manera iterativa con el tercero, lanza un proceso de optimización a través del cual se generan poblaciones de escenarios que, posteriormente, son evaluados a través de los modelos de simulación generados en el paso tercero. Así, para cada

escenario se calculan los indicadores y se genera la función bi-objetivo de coste beneficio, donde la agregación de los indicadores de coste y beneficio se genera a través de los pesos otorgados por los usuarios a través de la comparación por pares. De cada población se toman los mejores escenarios (aquellos en el frente de Pareto) y se mutan mediante un algoritmo de optimización para generar nuevas poblaciones. Este proceso continua hasta que se encuentra un conjunto de escenarios que se consideran óptimos, finalizando así el proceso de optimización y mostrando el conjunto de soluciones al usuario.

Finalmente, como último paso, el usuario puede exportar la información generada durante el proceso a través de informes que incluyen los resultados del escenario seleccionado así como los modelos de datos de las tecnologías propuestas con objeto de poder integrarlos en los modelos y la documentación que regirán las fases siguientes del proceso.

De entre todos los elementos que permiten la ejecución de estos procesos, existen dos módulos que están directamente relacionados con el esquema de evaluación propuesto en la presente tesis doctoral: el módulo de simulación, y el módulo de optimización, destacando dentro de este último un sub-componente que implementa el proceso de evaluación.

El módulo de simulación es el responsable de crear los modelos de simulación para cada escenario candidato, devolviendo los valores de los indicadores para el distrito tras la ejecución de los motores de simulación integrados en la herramienta (como EnergyPlus para el cálculo de indicadores energéticos). Por su parte, el módulo de optimización se encarga de buscar el mejor conjunto de escenarios candidatos. Este módulo se basa en un algoritmo de Búsqueda de Armónicos multi-objetivo [20] que optimiza los escenarios candidatos en base a dos criterios: coste y beneficio, siendo éstos índices compuestos basados en la agregación ponderada de los indicadores de coste y de beneficio respectivamente y que son calculados a través de un sub-componente denominado “Evaluador”.

Este sub-componente se ha desarrollado para integrar los resultados de los indicadores resultantes del diagnóstico de la situación base, los objetivos establecidos por el usuario de la herramienta para ciertos indicadores, las condiciones de contorno cuando estas se han definido y los pesos para el cálculo de los índices compuestos de coste y beneficio. Como resultado, se obtienen los valores de coste y de beneficio para ser graficados y generar el frente de Pareto, así como información sobre el cumplimiento de los objetivos o sobre si los indicadores se encuentran dentro del rango establecido por el usuario en las condiciones de contorno.

Así, el evaluador es ejecutado por el módulo de optimización para evaluar cada escenario de manera individual. Las poblaciones de escenarios generadas por el optimizador se componen de 50 escenarios en cada iteración, por lo que el evaluador se lanza 50 veces cada iteración, generándose una nueva población con los mejores resultados obtenidos en un lazo continuo hasta que se alcanzan una serie de criterios de parada basados en la proximidad a los objetivos establecidos por el usuario.

#### **2.4.7 Validación del sistema de indicadores y de las técnicas de evaluación en un caso de estudio**

La metodología propuesta y el sistema de evaluación se han validado en un caso de estudio ficticio, que aparece en el segundo artículo, y en un caso real, que es el objeto de los artículos primero y tercero. Este caso se corresponde con el distrito de Cuatro de Marzo, en la ciudad de Valladolid, donde se llevó a cabo una rehabilitación energética en el marco del proyecto R2CITIES bajo la metodología desarrollada en dicho proyecto, y que es la que se presenta en esta tesis doctoral. Igualmente, el barrio de Cuatro de Marzo se utilizó como caso para la validación de los desarrollos del proyecto OptEEmAL, donde la parte correspondiente al sistema de evaluación es igualmente parte de esta tesis.

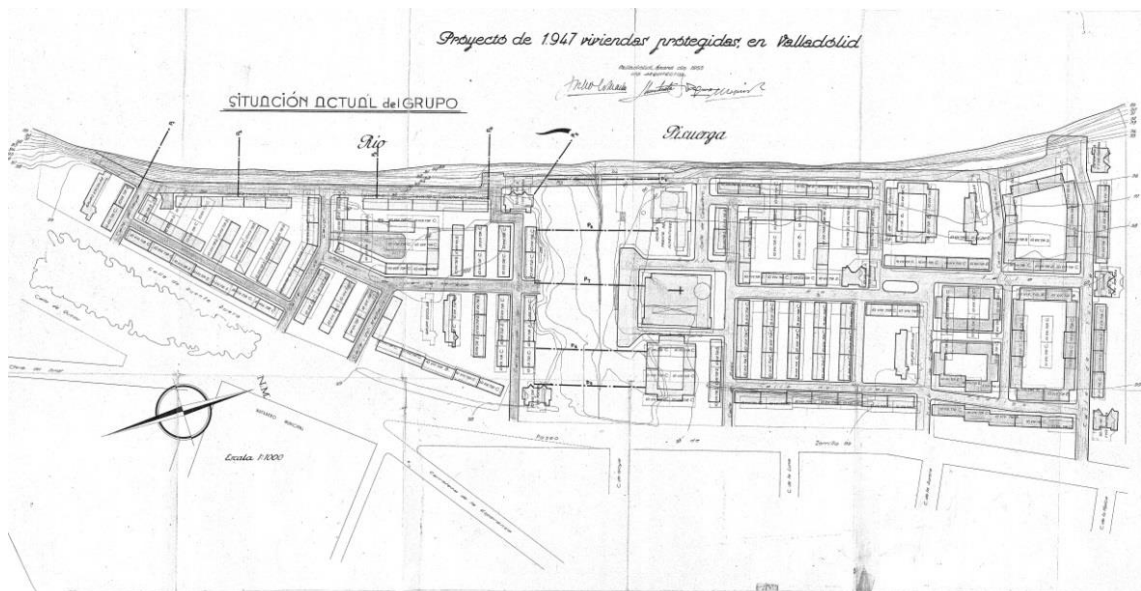
El distrito de Cuatro de Marzo surgió para dar respuesta a la gran demanda de vivienda que surgió a mediados del s. XX a causa del movimiento migratorio de los núcleos rurales a las poblaciones urbanas. En el caso particular de Valladolid, en la década de los 60 la población sufre el mayor crecimiento de su historia, cifrado en un 55,0%, y en la siguiente década aumenta en otro 36,9%, alcanzando un total de 320.281 habitantes en 1981.

Para dar respuesta a la gran demanda de vivienda, se llevaron a cabo grandes promociones de vivienda protegida, desarrollándose en un tiempo relativamente corto bajo un proyecto único, donde el planeamiento, gestión, parcelación, urbanización y edificación corresponden a un mismo agente público [21]. Estos proyectos de conjunto, que asumen el discurso del Movimiento Moderno y aplican los principios de diseño de la vivienda higiénica y soluciones constructivas recurrentes, dotaron a estos distritos de un carácter homogéneo, a diferencia de las operaciones urbanísticas más actuales; con parámetros de escala y condiciones de planeamiento controladas y tipologías que casi siempre son de bloque abierto y torre [22]. De esta manera “la eclosión del lenguaje moderno se hizo en perfecta simbiosis con la precariedad tecnológica y de materiales que entonces imperaba” [23]. Todos estos

condicionantes “contribuyeron a explicar las innumerables deficiencias de que adolecen la mayor parte de las realizaciones oficiales” [24].

Así, Cuatro de Marzo surge al amparo de las grandes promociones estatales de vivienda protegida, bajo un proyecto único, con parámetros de escala y condiciones de planeamiento controladas y tipologías de bloque abierto y torre.

Redactado por los arquitectos M. López, J. González, J. Vaquero y L. Tuesta y promovido por el Patronato Francisco Franco, el proyecto fue aprobado por el Instituto Nacional de Vivienda en 1957 y se realizó en dos fases, sumando un total de 1.947 viviendas, una iglesia, cuatro grupos escolares, veintiún comercios, un edificio dotacional y la urbanización del conjunto (Figura 6).



**Figura 6.** Proyecto de 1947 viviendas protegidas en Valladolid en el barrio del Cuatro de Marzo. Plano de situación del proyecto original [25].

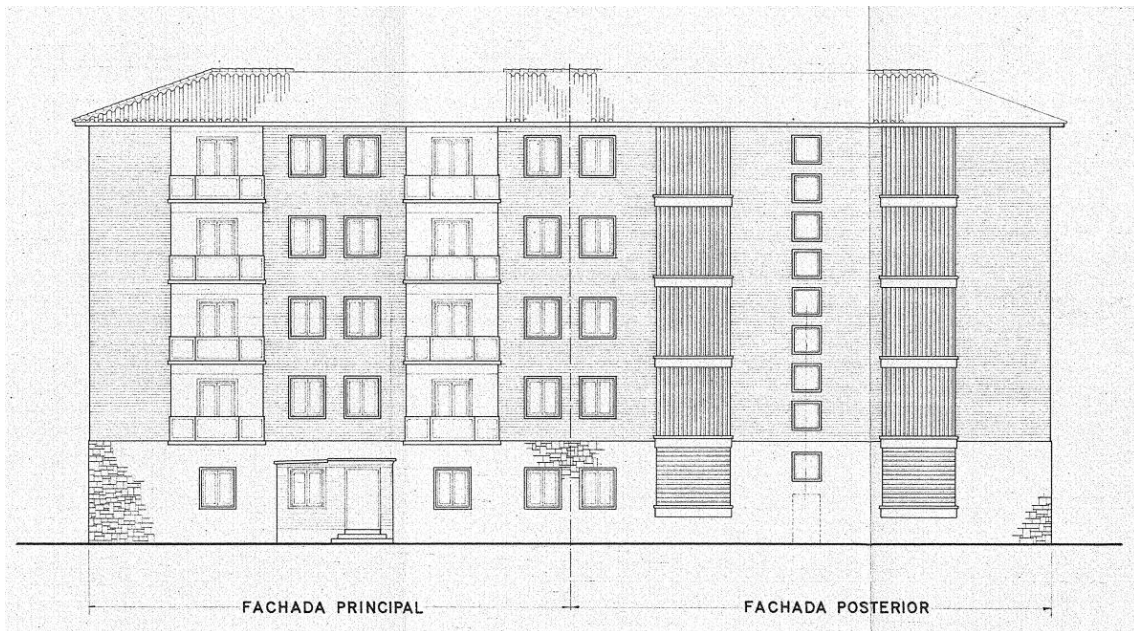
Sobre una superficie de parcela de 16 ha. se construyeron un total de 81.000 m<sup>2</sup> de uso residencial -vivienda protegida- distribuidas en 183 bloques lineales de B+4 o B+3 y 6 torres de B+10. Existen cuatro tipos diferentes de viviendas, que oscilan entre los 70 y 100 m<sup>2</sup> y tienen un programa común compuesto por salón-comedor, cuatro o cinco dormitorios, cocina, despensa, baño, aseo y dos terrazas.

En cuanto a las características constructivas, los edificios se resuelven con muros de carga perimetrales de asta y media de ladrillo cara vista sobre muro de zócalo de 45 cm de espesor de mampostería regular trasdosado con hormigón en masa, además de muro de carga



central de un asta de ladrillo galletero. Las cubiertas se resuelven con bóvedas vaídas sobre tablero de rasilla.

La Figura 7 muestra el alzado del proyecto original, mientras que la Figura 8 refleja la planimetría generada a través del modelo BIM para las actividades de validación de la metodología llevadas a cabo en el marco de los proyectos R2CITIES y OptEEmAL y que se incluyen en la presente tesis doctoral.



**Figura 7.** Proyecto de 1947 viviendas protegidas en Valladolid en el barrio del Cuatro de Marzo. Alzado de Vivienda tipo [25].



**Figura 8.** Planos extraídos del modelo de BIM generado con Autodesk Revit™. Vivienda tipo.

Dadas las características de estos distritos residenciales, al gran potencial de ahorro energético que aparece, junto con unas fuertes necesidades de mejora de las condiciones de confort, se unen una serie de ventajas que hacen que haya que focalizar los esfuerzos sobre estas áreas urbanas, ya que además de la cantidad de energía gris que almacenan (aquella empleada en su construcción y que no es necesario volver a invertir), tienen buenas características de centralidad, infraestructuras urbanas, mezcla de usos y cohesión social.

## 2.5 Hipótesis

Con todas las consideraciones metodológicas anteriores, el planteamiento de esta tesis doctoral se basa en el desarrollo y validación de la siguiente hipótesis:

**Es necesario el desarrollo de nuevas metodologías de evaluación integral que aumenten la colaboración y permitan transformar los criterios y prioridades de los agentes de la cadena de valor de la rehabilitación energética en sistemas de comparación de las alternativas de diseño. Estas metodologías, mediante la implementación de mecanismos de toma de decisión más informados, pueden contribuir a mejorar el proceso y desbloquear el potencial existente en la descarbonización y mejora del confort de los edificios existentes.**



# ESTADO DEL ARTE



### 3 Estado del arte

La cuestión sobre la eficiencia energética se ha establecido como una prioridad esencial en el sector de la edificación, en particular en el sector residencial, con un alto consumo de energía durante todas las fases del ciclo de vida: desde la obtención de materiales, la ejecución, la operación y mantenimiento, hasta la demolición. Los distintos países de la UE han establecido dentro de su marco normativo la transposición de la Directiva Europea sobre Eficiencia Energética (EPBD), centrando sus esfuerzos, especialmente, en el sector de la nueva construcción [26].

Sin embargo, dado el amplio parque residencial existente en estos países, la baja tasa de nuevas construcciones, y el estado en que se encuentran la mayoría de los edificios ya construidos, el potencial de ahorro es muy alto, a lo que se suma la cantidad de energía gris que poseen estos edificios, siendo ésta la energía utilizada durante la fase de construcción. Así, numerosos proyectos abordan la rehabilitación de edificios como un ámbito clave para el futuro, pero las barreras que aparecen hacen que, en numerosas ocasiones, no sea sencillo el aplicar las medidas necesarias en este tipo de intervenciones. Con un marco normativo aún sin la madurez suficiente, lo que provoca grandes barreras en muchas ocasiones, unos costes elevados a la hora de implementar ciertas tecnologías innovadoras o muy eficientes y la ausencia de modelos de negocio avanzados en este ámbito, parece necesario un fuerte cambio estratégico que necesariamente debe comenzar por el análisis de la situación actual y su tendencia en el futuro, y por el desarrollo de metodologías que hagan bancables estas intervenciones, superando las barreras existentes y haciendo más eficientes los procesos. Así, mientras la mayor parte de proyectos que se realizan en este ámbito se centran en la escala de edificio, al dar el salto a la escala de distrito el número de medidas que se pueden aplicar se amplía, así como disminuyen los retornos de la inversión al considerar economías de escala. Esto unido al gran potencial de replicabilidad que deriva de la homogeneidad tipológica de muchas de las grandes áreas residenciales de nuestras ciudades, que precisamente son las que presentan un mayor potencial de ahorro (aquellas de promoción pública realizadas entre los 50 y los 70), hace que metodologías holísticas y sistémicas de diagnóstico, evaluación de medidas

de conservación de la energía, procesos optimizados de ejecución y validación final de resultados puedan lograr unos objetivos mucho más ambiciosos que con intervenciones aisladas.

De esta manera, un gran número de proyectos en los últimos años tratan de dar respuesta a este problema, asumiendo que el salto de escala es esencial en este tipo de intervenciones y planteando procesos más eficientes y analizando las barreras que pueden provocar un cambio estratégico incluso a nivel normativo.

Este es el caso de los dos proyectos en los que se enmarca este trabajo de investigación, y cuyos resultados buscan desarrollar un marco metodológico y posteriormente una herramienta de diseño de proyectos de rehabilitación energética a nivel de distrito. Su objetivo es el de proporcionar un diseño sistemático, integrado y optimizado basado en un enfoque de tipo IPD, reduciendo el tiempo de desarrollo de los mismos y las incertidumbres asociadas al proceso, resultando en mejores soluciones cuando se comparan con las prácticas habituales en el negocio, contribuyendo así al diseño de rehabilitaciones eficientes en el uso de energía y recursos a nivel de distrito y también de edificio.

Así, son tres los componentes principales que integran la investigación, y cuyo estado del arte se describe en las siguientes subsecciones: metodologías para la interacción entre los agentes involucrados en la rehabilitación, métodos y herramientas existentes de soporte a la evaluación y toma de decisiones y, finalmente, la aplicación de técnicas de toma de decisión multi-criterio al problema de la rehabilitación energética.

### **3.1 Metodologías de interacción entre los agentes de la rehabilitación**

La implementación de proyectos de rehabilitación energética no es solo un reto desde el punto de vista de la complejidad del diseño y de los análisis requeridos para la toma de decisiones, sino también en términos del número de agentes involucrados en la cadena de valor. Además, cada proyecto es específico por lo que no es sencillo establecer una aproximación estandarizada para todos los proyectos de rehabilitación. A esto se une el hecho de que entre los diferentes países o regiones también existen diferentes estructuras organizativas y procedimientos, lo que dificulta esta estandarización.

Generalmente la participación de los agentes de un proyecto de rehabilitación energética se puede clasificar en tres grupos: (1) grupo ejecutivo, (2) grupo operacional y (3)

grupo de interés [27]. El grupo ejecutivo incluye a agentes como las administraciones públicas, promotores, inversores o propietarios y gestores de edificios. Este grupo se encarga de establecer las directrices del proyecto de rehabilitación así como de identificar los objetivos perseguidos y las limitaciones. Este grupo está fuertemente influenciado por el contexto regulatorio, incluyendo especialmente las directivas energéticas. El grupo operacional incluye a contratistas, constructores, proveedores de servicios, gestores de redes así como oficinas de planificación, diseño e ingeniería. Este grupo es el que aporta el conocimiento técnico para llevar a cabo la rehabilitación energética así como de priorizar las acciones en base a mejorar la eficiencia del proceso y la reducción de costes. Finalmente, el tercer grupo es el de interés, donde se encuentran los usuarios de los edificios rehabilitados que son los que se benefician de su mejora energética.

La comunicación entre estos agentes así como su representación en el proceso de toma de decisiones es esencial para evitar modificaciones en estadios posteriores del proceso de rehabilitación, los cuales incrementan considerablemente los costes y los tiempos de ejecución. En este sentido, resulta oportuno recordar que mientras que en un proceso de construcción de obra nueva este impacto es considerable, en un proyecto de rehabilitación adquiere una dimensión mucho mayor debido a la complejidad de las modificaciones.

Para mejorar las comunicaciones y la involucración de los agentes en el proceso de rehabilitación energética (o en cualquier proceso constructivo) surgen metodologías que buscan una mayor integración entre “las personas, sistemas, estructuras de negocio y prácticas en procesos que aprovechan los talentos e ideas de todos los participantes de manera colaborativa para optimizar los resultados del proyecto, incrementar el valor para el propietario, reducir residuos y maximizar la eficiencia a través de todas las fases de diseño, fabricación y construcción” [28]. Este es, precisamente el elemento principal de la metodología Integrated Project Delivery (IPD) que puede aplicarse a diferentes tipos de contratos y que busca una colaboración muy efectiva entre los tres agentes principales (Propietario, Proyectista Principal y Constructor Principal) durante todas las fases del proyecto, pudiendo además incluir a otros agentes según los mismos principios.

### **3.1.1 Comparativa entre un proyecto tradicional y la metodología IPD**

Un enfoque basado en IPD requiere una contribución temprana de conocimiento y experiencia, así como una participación proactiva de los participantes clave donde además las decisiones siempre se toman en base a lo “mejor para el proyecto”.



Este concepto difiere del proceso tradicional en la manera de definir los principales aspectos de cada uno de los agentes involucrados en el proyecto. De esta manera, la principal diferencia radica en que, de manera contraria a lo que ocurre en un proceso tradicional, en IPD no existe una jerarquía dentro del equipo permitiendo una mayor apertura y colaboración entre los diferentes actores y estando el equipo ensamblado desde las fases más iniciales del proyecto. En un proceso tradicional, sin embargo, el equipo se va ensamblando a medida que van avanzando las fases y los diferentes actores aparecen solo en el momento en que son necesarios, teniendo así una gran estructura jerárquica que provoca discrepancias en el proceso de toma de decisiones. Estas diferencias se analizan en la siguiente Tabla 2.

**Tabla 2.** Comparativa entre un proceso tradicional e IPD [29].

<b>Tradicional</b>		<b>Integrado</b>
Fragmentado, ensamblado solo si es necesario o mínimamente necesario, muy jerárquico y controlado	Equipos	Entidad formada por los agentes clave, ensamblada en estadios tempranos, abierto y colaborativo
Lineal, segregado, el conocimiento se integra según se necesita; la información es acumulada; silos de conocimiento y experiencia	Proceso	Concurrente y multi-nivel; contribuciones muy tempranas de conocimiento y experiencia; información abierta; respeto y confianza mutua
Gestionados individualmente, transferidos lo máximo posible	Riesgos	Gestionados de manera colaborativa y compartidos apropiadamente
Individualmente; esfuerzo mínimo para máximo retorno; (generalmente) basado en primer coste	Compensación	El éxito del equipo se basa en el éxito del proyecto; basado en valor
Digital pero bi o tri-dimensional	Tecnología	Digital, virtual; uso de modelos BIM (3, 4 y 5 dimensiones)
Fomentan el esfuerzo uni-lateral; transfieren riesgos, no se comparten	Acuerdos	Fomentan, promueven y dan soporte a un sistema colaborativo abierto y multi-lateral; comparten riesgos

Así generalmente en el proceso tradicional el propietario establece los objetivos y barreras del proyecto sin apenas interacción con el Proyectista Principal. Éste debe elaborar una propuesta de diseño que se ajuste a los requisitos del primero sin apenas interacción con el Constructor Principal. Y así, en cada fase, es necesario llevar a cabo re-ajustes debido a la falta de un proceso colaborativo que permita ahorrar tiempos y costes.

En el proceso integrado, por el contrario, todos los actores principales (Propietario, Proyectista Principal y Constructor Principal) trabajan juntos en la definición de barreras y objetivos, y en el caso de un proyecto de rehabilitación, evalúan juntos el escenario de partida

para poder identificar el mejor escenario de rehabilitación de manera consensuada e integrando los criterios de cada uno de ellos.

En definitiva, esta metodología permite una definición y coordinación mucho mayor en los estadios previos al inicio de la construcción según se muestra en la Figura 9 permitiendo un proceso de construcción mucho más eficiente y reduciendo los tiempos.

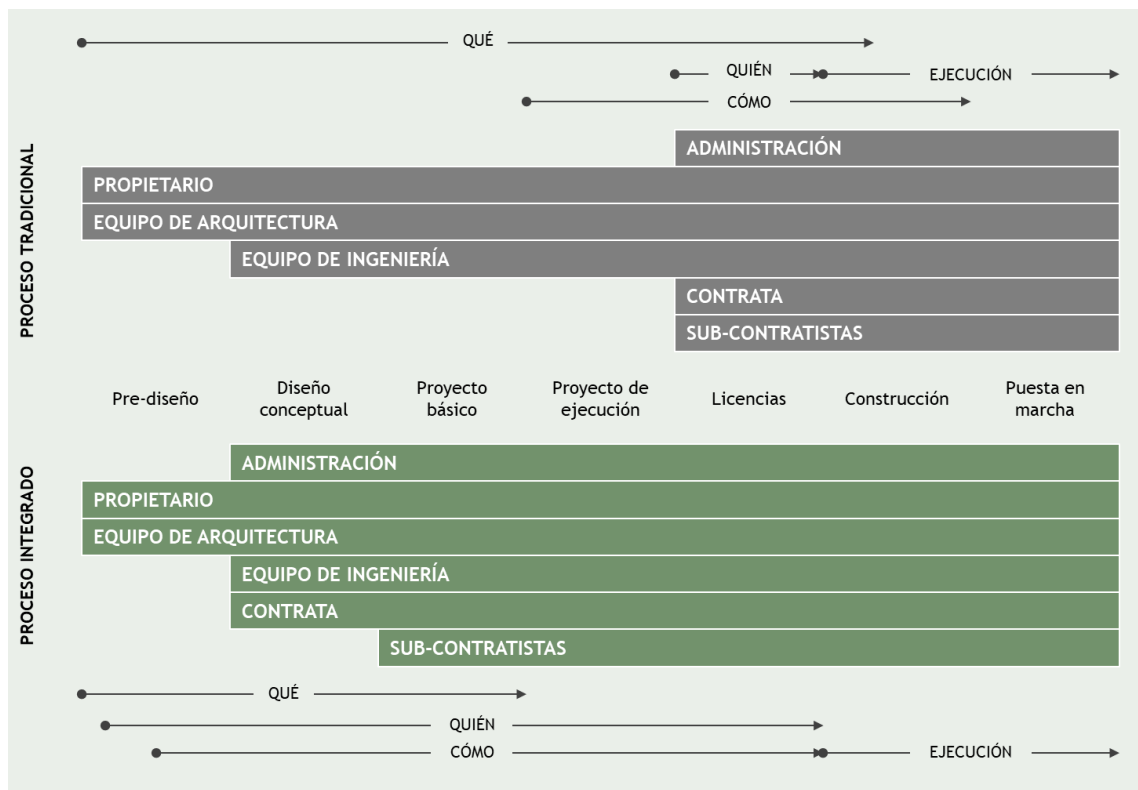


Figura 9. Proyecto tradicional y proyecto integrado. Adaptado de: AIA California Council [30].

### 3.1.2 BIM e IPD

Los Modelos de Información del Edificio (Building Information Modelling, BIM) son instrumentos que permiten gestionar de manera simultánea una gran cantidad de información y que, además, permiten realizar un modelo virtual con gran similitud al edificio construido de manera previa a la fase de construcción. Así, estos modelos permiten pre-construir el edificio pudiendo anticipar problemas que, de otra manera, surgirían en obra con las implicaciones en tiempos y costes que ello conlleva.

Así, los modelos BIM son un repositorio que permiten centralizar una gran cantidad de información sobre el edificio como la información geométrica, de materiales, sistemas e instalaciones, usos y ocupaciones o costes. Estos modelos permiten así trabajar de manera colaborativa a los diferentes agentes siempre sobre una misma base de datos evitando

inconsistencias a la hora de proyectar y planificar los diferentes elementos. Además, el modelo puede evolucionar de acuerdo a la realidad, integrando así no solo el diseño, sino también representando la realidad finalmente construida lo que permite utilizar el modelo para aspectos relacionados con la gestión del edificio o fases posteriores.

Por tanto, los modelos BIM más que ser una representación 3D del edificio son una integración de:

- Información que define los productos (edificio, sistemas, etc.)
- Propiedades de los productos (por ejemplo: transmitancia térmica)
- Geometría que representa las características físicas
- Datos de visualización que permiten otorgar a los objetivos una apariencia reconocible
- Datos funcionales como detección de zonas que permite que los objetivos estén posicionados y se comporten de la misma manera que el producto que representan

Con estas consideraciones, y a pesar de que la metodología IPD no requiere necesariamente la utilización de modelos BIM, su uso mejora considerablemente la implementación del proceso integrado y colaborativo ya que las herramientas BIM otorgan acceso continuo a la información a los diferentes agentes y les permiten colaborar sobre el diseño de una manera mucho más eficaz.

### **3.2 Herramientas de soporte al diseño de proyectos de rehabilitación energética**

Son numerosas las herramientas que existen buscando dar respuesta a la necesidad de mejorar y dar soporte a la toma de decisiones para llevar a cabo proyectos donde la componente de mejora energética (o de aspectos relacionados con la sostenibilidad en su más amplio espectro) son un eje relevante. Existen estudios, como [31] que analizan estas herramientas así como las componentes que consideran.

Este informe concluye que existen más de 110 herramientas de Validación de Sostenibilidad de Barrios<sup>5</sup> y 105 herramientas de cálculo<sup>4</sup> (48 de ellas a escala de barrio y 57 a escala de edificio) dentro del concepto de “diseño de proyectos de rehabilitación sostenible de

---

<sup>5</sup> Definidas como herramientas que permiten evaluar el comportamiento de un conjunto de edificios en base a ciertos criterios y aspectos.

<sup>4</sup> Definidas como herramientas de software que permiten calcular o simular indicadores.

barrios”. Sin embargo, en el momento del estudio no existía una herramienta única que implementase un enfoque multi-disciplinar a escala de distrito. La siguiente Tabla 3 muestra un resumen de las herramientas existentes más destacadas, analizando su alcance, el método de cálculo y los indicadores evaluados. Así, surge la necesidad de desarrollar un sistema integrado que permita centralizar toda la información necesaria para desarrollar proyectos de rehabilitación energética a escala de distrito para facilitar y mejorar procesos multi-disciplinarios. Esto puede contribuir a simplificar este proceso de toma de decisiones a través de agregar todos los factores relevantes en un proyecto de rehabilitación energética de distrito en un único sistema.

**Tabla 3.** Herramientas de evaluación existentes [32].

		Edificio														Distrito									
		G.B. Studio	CYPECAD MEP	Design Builder	DOE-2	EnergyPlus	IES	TRNSYS	ECOEFFECT	LEGEP	ENVEST 2	BEE5	ATHENA	ECO-QUANTUM	GaBI	SimaPro	ELODIE	SOFIAS	TRACE	Transep-DGO	CitySim	SITES	Living CC	NEST	
<b>Herramientas existentes</b>		Global	España	Global	Global	Global	Global	Global	Suecia	Alemania	UK	USA	Canada	Australia	Global	Global	France	España	Global	Holanda	Global	Global	Global	France / España	
<b>Alcance geográfico</b>									X	X	X	X	X	X	X	X	X							X	
<b>Análisis Ciclo de Vida</b>																									
<b>Método</b>	<b>Cualitativa</b>																					X	X		
	<b>Cuantitativa</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
<b>Indicadores evaluados</b>	<b>Energía</b>	X	X	X	X	X	X	X											X	X	X	X	X	X	
	<b>Confort</b>		X	X	X	X	X	X														X		X	
	<b>Acústicos</b>		X																						
	<b>Ambientales</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	<b>Económicos</b>		X	X	X		X		X	X	X	X			X			X							X
	<b>Bienestar social</b>																						X	X	X
	<b>Morfología urbana</b>																					X	X	X	
	<b>Gobernanza</b>																								

Como respuesta a esta necesidad surge la componente de la presente investigación a través de generar un esquema de evaluación único que permita integrar esta información de manera que simplifique la toma de decisiones. Este esquema debe permitir cuantificar, a través de un sistema de indicadores, el comportamiento de los edificios respecto a diversos criterios relacionados con la implementación de proyectos de rehabilitación energética y siempre atendiendo a la escala de distrito a través de considerar el conjunto de edificios como una única entidad objeto de los escenarios de mejora.

### **3.3 Esquemas de evaluación y estrategias de optimización de escenarios de rehabilitación energética**

Además de la implementación de un sistema que facilite los procesos colaborativos entre los agentes y que genere un esquema único para poder caracterizar las alternativas de diseño, la tercera componente de la presente investigación se basa en la aplicación de técnicas multi-criterio para poder comparar las alternativas.

Estos sistemas se basan en la aplicación de pesos al sistema de indicadores de manera que permitan transformar un esquema subjetivo que refleje las prioridades de los agentes involucrados en el proceso, en un sistema matemático que permita cuantificar las mejoras de acuerdo a dichas prioridades.

Según [33], los métodos de ponderación se pueden clasificar en cuatro grandes tipos:

- Enfoques proxy donde la evaluación se basa en la selección de uno o una serie de indicadores que representan el impacto total siendo el peso de estos indicadores 1 y del resto 0.
- Métodos de monetización donde los impactos ambientales se traducen en unidades monetarias utilizando tasas de descuento cuando sean necesario y considerando, por tanto, la disposición a pagar.
- Métodos de distancia al objetivo donde las puntuaciones se relacionan con objetivos externos (por ejemplo políticos, límites estimados científicamente, umbrales, etc.)
- Métodos de panel donde se genera un grupo de expertos que asignan pesos y que se pueden distinguir según el método empleado, la composición del panel, el procedimiento o el resultado.

Cada método presenta una serie de ventajas y desventajas que desvirtúan en mayor o menor medida el resultado como, por ejemplo, la eliminación de indicadores o el establecimiento de límites basados en un análisis científico profundo.

Para poder aplicar estas metodologías al problema sobre la toma de decisiones en proyectos de rehabilitación energética es necesario seguir una serie de pasos:

- Identificación y definición de los agentes de la toma de decisiones
- Definición de los objetivos del proyecto
- Definición de los escenarios propuestos como alternativas de decisión
- Establecimiento de los criterios de evaluación (indicadores)
- Definición de los requisitos mínimos para cada criterio (umbrales límite)
- Normalización y escalado
- Propuesta para establecer los criterios de priorización (dependientes o independientes)
- Caracterización de los tipos de pesos y puntuaciones requeridas
- Ponderación de los indicadores

Dada la variabilidad de las condiciones de contorno para llevar a cabo un proyecto de rehabilitación energética se considera que los métodos basados en paneles de expertos son los que mejor se pueden ajustar a la hora de generar el sistema de evaluación.

Los métodos de panel para “provocar” a los indicadores dependen, como se menciona anteriormente, del método seleccionado (cuestionarios, entrevistas o discusiones de grupo), composición del panel (expertos, no expertos o agentes involucrados), procedimiento (ronda única o métodos Delphi) y resultado (consenso o análisis estadístico de resultados).

Dentro de los métodos de panel existen numerosas alternativas para su implementación [34]: puntuación directa, tarjetas de simos, ranking de indicadores, comparación por pares y la teoría clásica del valor multi-atributo que se puede adaptar para otros procedimientos.

En la búsqueda de un esquema de evaluación que permita adaptarse a las necesidades de cada proyecto, el fin último es el establecimiento de un método que, de manera sencilla, pueda modificar los pesos de los criterios para cada proyecto, involucrando de manera

adecuada a los agentes a través de técnicas colaborativas para identificar la importancia de los criterios.

Así, dentro de la presente investigación se emplean dos técnicas, una primera basada en paneles de expertos y cuestionarios de lógica difusa para la generación de los pesos y una segunda aproximación que integra un sistema de comparación por pares.

### **3.3.1 Técnica de lógica difusa**

El panel de expertos debe indicar la importancia de cada uno de los indicadores en base a su conocimiento y experiencia. Para facilitar esta labor, la utilización de técnicas de lógica difusa permite la incorporación de las opiniones de estos expertos y la transformación de las mismas en un esquema de ponderación para los indicadores. El método de Lógica Difusa Delphi [35] es una adaptación de los métodos de lógica difusa que se basa en: respuestas anónimas, procesos iterativos y respuestas controladas que otorga una respuesta estadísticamente válida del grupo. La formulación difusa propone gestionar un nivel controlado de incertidumbre o ambigüedad que de forma inherente subyace detrás del procedimiento para establecer un valor exacto cuantitativo que refleja la opinión del experto. De esta manera la eficiencia y calidad de los cuestionarios de lógica difusa se mejoran.

El método Delphi de lógica difusa se puede resumir en los siguientes pasos:

- Se establece una estructura de indicadores para los que se desea establecer el nivel de importancia según los expertos.
- Se recogen las opiniones de los expertos a través de un cuestionario que incluye los indicadores y un sistema puntuación.
- Se calculan los números triangulares difusos de acuerdo con el método propuesto por [36]. Cada número difuso representa una puntuación a través de una escala desde (1) “sin nada de importancia” hasta (9) “muy importante” para cada indicador de cada uno de los expertos.
- Se aplica una técnica de des-difusión para identificar la importancia de cada uno de los indicadores. Para este proceso se pueden emplear técnicas como el Centro de Gravedad [37] del triángulo que representa el número difuso.
- Se aplican unos umbrales mínimos para eliminar los pesos no relevantes cuando están por encima o debajo del percentil-25 del valor medio.

Así, este método permite transformar los criterios de un grupo de expertos en un esquema para ponderar los indicadores en base a la importancia otorgada por los mismos.

### 3.3.2 Sistema de comparación por pares

Otro método es el Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) y el sistema de comparación por pares. Este método establece que: un proceso de toma de decisiones se puede estructurar en cuatro pasos: definir el objetivo, estructurar la jerarquía de toma de decisiones, construir un conjunto de matrices de comparación por pares y emplear las prioridades obtenidas en la comparación para ponderar las prioridades del nivel inmediatamente inferior.

Este método permite un sistema intuitivo y sencillo para establecer la importancia asociada a cada indicador, basado en comparar los indicadores uno a uno en parejas. Esta técnica ha demostrado ser un método consistente que puede aplicarse a diversos problemas de toma de decisiones como puede ser la priorización de alternativas de rehabilitación energética.

Con objeto de construir el esquema de ponderación, se genera una matriz de comparación por pares donde se compara cada criterio respecto del objetivo (a través de los índices compuestos) y los sub-criterios entre sí en segundo lugar (los indicadores) como muestra, a modo de ejemplo, la siguiente Figura 10.

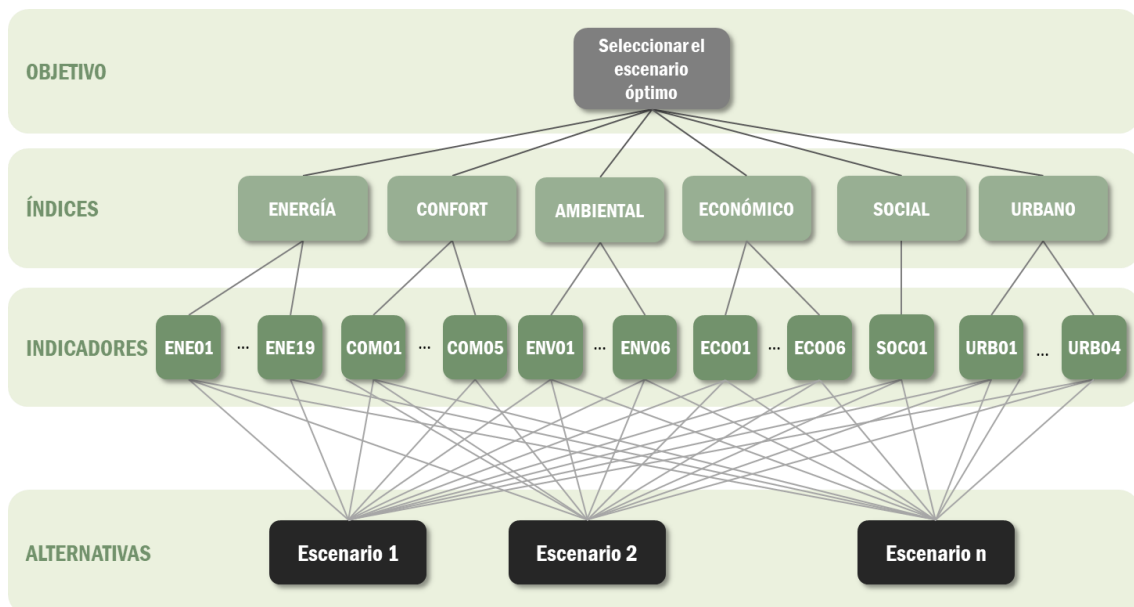


Figura 10. Jerarquía de índices e indicadores empleada en la presente investigación.

Los valores relativos a la intensidad de la importancia, de acuerdo a [38], se deben establecer a través del consenso del panel de toma de decisiones (o expertos en caso de pesos



fijos), donde cada participante debe comparar de manera individual los criterios en un método por pares indicando si el criterio es más importante que aquel con el que se está comparando, y se cuantifica su mayor o menor importancia. Una vez que cada miembro del panel de toma de decisiones ha establecido sus niveles de importancia, estos deben discutirse entre los diferentes representantes para alcanzar un consenso que permita generar el esquema de ponderación acordado. Si no se alcanza el consenso, se pueden emplear valores medios entre las diferentes intensidades otorgadas.

La Tabla 4 incluida a continuación indica los niveles de intensidad de importancia que se otorga a cada comparación.

**Tabla 4.** Escala fundamental de números absolutos [39].

<b>Intensidad de importancia</b>	<b>Definición</b>	<b>Explicación</b>
1	Misma importancia	Dos criterios contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente un criterio sobre el otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen considerablemente un criterio sobre el otro
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Un criterio es muy considerablemente importante que el otro; su dominancia se ha demostrado en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia posiciona un criterio como el más importante respecto del otro
Recíprocos de los anteriores	La importancia de cada indicador (i) respecto de aquel con el que se ha comparado (j) es el valor recíproco del segundo (j) sobre el primero (i)	

De acuerdo a este método, las matrices de comparación por pares deben construirse de manera que establezcan la importancia de cada criterio en los diferentes niveles de jerarquía para lograr un objetivo definido.

Por tanto, si existen varios niveles de jerarquía (como el representado en la Figura 10) se deben comparar en primer lugar los índices entre sí, para establecer la importancia de cada uno de ellos y, posteriormente, cada grupo de indicadores dentro de cada índice entre sí. De esta manera, la importancia total de cada indicador en el esquema global será su propia

importancia dentro del grupo que representa el índice por la importancia del índice donde se encuentra incluido.

Así, continuando con este ejemplo, la matriz de comparación entre los índices sería de la siguiente forma:

**Tabla 5.** Matriz de comparación por pares de los principales criterios con respecto al objetivo

	<b>Energía</b>	<b>Confort</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Económico</b>	<b>Urbano</b>
<b>Energía</b>	1	ENE/COM	ENE/ENV	ENE/ECO	ENE/URB
<b>Confort</b>	COM/ENE	1	COM/ENV	COM/ECO	COM/URB
<b>Ambiental</b>	ENV/ENE	ENV/COM	1	ENV/ECO	ENV/URB
<b>Económico</b>	ECO/ENE	ECO/COM	ECO/ENV	1	ECO/URB
<b>Urbano</b>	URB/ENE	URB/COM	URB/ENV	URB/ECO	1

Los principios del AHP establecen que la matriz es recíproca, siendo así la comparación de cada criterio respecto de sí mismo igual a 1, mientras que los valores por encima de la diagonal se corresponden con los inversos de los valores por debajo de la diagonal. Tras generar las matrices de comparación, el peso de cada indicador se calcula mediante el auto-vector de la matriz [40].

### 3.4 Avances sobre el estado del arte

Con estas consideraciones, la presente tesis doctoral ha trabajado en la generación de un marco metodológico que integra un sistema de evaluación basado en técnicas de priorización como soporte a la toma de decisiones. Así, estos planteamientos aportan nuevos conocimientos más allá del estado del arte. Esto se logra a través de la integración de metodologías basadas en procesos colaborativos y su combinación con técnicas de toma de decisión multi-criterio para cubrir el hueco existente en los métodos y herramientas existentes que no abordan estos aspectos de manera conjunta integrando, además, el salto de escala de edificios a distritos.



## **ARTÍCULO 1:**

Metodología de soporte al diseño de proyectos de rehabilitación energética de barrios basada en una aproximación de análisis multicriterio



## **4 Metodología de soporte al diseño de proyectos de rehabilitación energética de barrios basada en una aproximación de análisis multicriterio**

### **4.1 Introducción**

La estrategia energética 2020 planteó como objetivo el incremento de la eficiencia energética como una forma de abordar el desafío de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de la UE. Uno de los principales enfoques propuestos para lograr este objetivo es aprovechar los sectores con mayor potencial de ahorro de energía, siendo uno de ellos el entorno construido [41].

El principal desafío podría resumirse como la capacidad de adaptar las ciudades europeas y los ecosistemas urbanos a sociedades más sostenibles, eficientes e inclusivas que puedan generar crecimiento, empleos y atraer inversiones. Por lo tanto, la necesidad de desarrollar nuevas metodologías y mejores modelos de negocio para abordar proyectos con objeto de mejorar la eficiencia energética en los edificios se ha convertido en un reto indudable en los últimos años. En general, los pilares para abordar este tipo de proyectos se basan en una evaluación profunda de las condiciones de confort interior y la integración de estrategias para reducir la demanda de energía, mejorar la eficiencia de los sistemas, la producción de energía a través de fuentes de energía renovables (EERR) y el uso de herramientas optimizadas para gestionar la energía consumida y producida [42].

En este sentido, mientras que para los edificios nuevos el concepto de edificios de energía casi nula (EECN) parece más factible y claro; en el caso de la rehabilitación de edificios, el problema no puede resolverse bajo los mismos principios. Además, la consideración de edificios aislados como unidades de energía únicas no siempre permite la implementación de las medidas necesarias para este objetivo. Sin embargo, si estas unidades de energía están compuestas por grupos de edificios, el conjunto de posibilidades es más amplio, apareciendo el

concepto de distritos de energía casi nula (DECN). Sin embargo, es importante considerar que en contraste con las ventajas derivadas de la consideración del distrito como unidad energética, que presentan un escenario favorable, también aparecen varias barreras al cambiar de escala de edificios a distritos. Por lo tanto, si bien las barreras tecnológicas generalmente se reducen a nivel de distrito debido a la amplia gama de Medidas de Ahorro de Energía (MAES) aplicables; las barreras económicas y legales generalmente se incrementan. Así, todavía existe una gran necesidad de coordinación administrativa para actualizar el marco regulatorio, junto con la necesidad de iniciativas y medidas específicas para apoyar la investigación y el desarrollo tecnológico. Una vez que se alcanza un alto nivel de madurez tecnológica, el tamaño crítico de las intervenciones marca la diferencia para lograr intervenciones financiadas [43]. Por lo tanto, la creación de economías de escala es un factor clave para la viabilidad y el éxito de este tipo de proyectos.

En este contexto, el proyecto europeo R2CITIES tiene como objetivo desarrollar y validar una metodología integrada y sistémica para la rehabilitación energética a escala urbana, proporcionando un instrumento metodológico y científico capaz de apoyar la evaluación e implementación de soluciones a nivel de distrito. Esta metodología se basa en el método de evaluación de Análisis de Decisión de Criterios Múltiples (en adelante MCDA por sus siglas en inglés) que considera múltiples criterios en entornos de toma de decisiones [44]. El objetivo es apoyar a los responsables de la toma de decisiones que afrontan el proceso de diseño de la rehabilitación energética del distrito, ya que no existe una solución óptima única para ello.

Se puede encontrar una gran cantidad de estudios sobre la rehabilitación energética de áreas residenciales en la literatura, pero normalmente se centran en la rehabilitación de edificios individuales o un grupo de edificios sin abordar el concepto holístico de distrito. Ma, Cooper et al. [45] realizan una revisión del estado del arte sobre diversas experiencias en rehabilitaciones de edificios existentes, mostrando también una metodología que cubre todas las etapas que deben abordarse cuando se enfrentan a actividades de rehabilitación. Así, este estudio muestra diferentes experiencias que logran ahorros que van del 20% al 60% dependiendo de la escala de intervención.

La metodología presentada en este artículo supone un paso más allá del estado del arte, abordando el cambio de escala de edificios a distritos y adoptando una estructura de gestión optimizada para mejorar la eficiencia del proceso.

## 4.2 Marco metodológico basado en 4 etapas para la rehabilitación energética de barrios

El principal aspecto innovador de la metodología (Figura 11) deriva de la utilización del concepto de Gestión Integrada del Proyecto (*Integrated Project Delivery, IPD*) acompañado de los principios de Modelado de Información de Edificios (*Building Information Modelling, BIM*) para mejorar la eficiencia durante todas las fases del proceso de rehabilitación y optimizar los resultados del proyecto. Los principios del IPD se traducen en un enfoque holístico del proceso de rehabilitación en el que todas las partes interesadas del proyecto y los participantes involucrados en la cadena de valor del proceso de rehabilitación trabajan en relaciones altamente colaborativas en todas las fases, mejorando así el procedimiento de puesta en marcha [46]. Esto da como resultado un plan intensivo de control de calidad que cubre todo el proceso destinado a mejorar la calidad de las soluciones diseñadas, mejorar la conformidad del diseño con las necesidades y demandas de los clientes y garantizar la intervención final funcional y de alta calidad. Además, la implementación de los métodos IPD requiere la utilización de herramientas de gestión integradas para apoyar la colaboración multifacética. Por lo tanto, se hace uso de herramientas BIM para almacenar la mayor parte de la información del proceso de rehabilitación, incluidas todas las fases de la metodología y el distrito durante su ciclo de vida. La utilización de esta representación virtual del distrito, que contiene toda la información y los parámetros, da como resultado la reducción de incertidumbres a lo largo del proceso [47]. Estos modelos permiten capturar toda la información relevante del distrito que respalda la utilización de herramientas (como EnergyPlus) para la evaluación de las etapas del proceso de rehabilitación: diagnóstico, evaluación de alternativas para el diseño o evaluación final. [48].



Figura 11. Propuesta de metodología para rehabilitación de distritos [136].



Junto con los principios de IPD y la implementación de los métodos BIM, la metodología se basa también en un sistema de Indicadores de Sostenibilidad del Distrito (*District Sustainability Indicators*, DSI) que se han definido específicamente para considerar al distrito como una unidad energética única donde la energía y las emisiones se balancean a nivel global. Esta unidad está compuesta por un conjunto de sub-entidades (edificios y sistemas de energía) que interactúan para cubrir las demandas de los usuarios con objeto de mantener las condiciones de confort.

#### **4.2.1 Etapa I – Auditoría**

La fase de diagnóstico se centra en la utilización de herramientas y métodos destinados a cuantificar cada DSI para las condiciones actuales del distrito. En una primera etapa, considerando las necesidades y demandas de los interesados, se define un conjunto preliminar de objetivos para optimizar los indicadores que deben abordarse. La recopilación de datos permite su cuantificación mediante simulaciones de rendimiento energético, monitorización y medida de ciertos parámetros, ensayos no destructivos, análisis de facturas energéticas o recopilación de datos de los usuarios relacionados con el confort, aspectos sociales o económicos. Todos estos datos se procesan y los DSI se cuantifican mediante métodos de cálculo estandarizados.

Por un lado, las herramientas de simulación del comportamiento energético son esenciales para el análisis de los aspectos relacionados con la energía y el confort. Las condiciones actuales del distrito se modelan tomando la información geométrica y constructiva de los modelos BIM, así como otros parámetros relacionados con el confort, los perfiles de energía, los horarios, etc., que se recopilan a través de los métodos mencionados anteriormente. Por otro lado, otros indicadores (como urbanos o económicos) permiten determinar las principales barreras y oportunidades para implementar ciertas medidas.

Una vez que se ha completado la fase de diagnóstico, se revisan los objetivos y las metas para alinearse con las necesidades y demandas del cliente establecidas al comenzar esta metodología. La ambición de estos objetivos en términos de ahorro de energía, mejora del confort u otros aspectos relacionados con problemas sociales (por ejemplo, accesibilidad) quedan determinados por las barreras, especialmente aquellas no técnicas relacionadas con aspectos legales o viabilidad económica. Para alinear las demandas de los clientes con los aspectos técnicos y normativos, es esencial la participación de todos los interesados durante el proceso de definición de los objetivos.

#### **4.2.2 Etapa II – Evaluación de MAES y diseño integral óptimo**

Esta fase comienza con el diseño conceptual y finaliza con un diseño detallado. Entre estas dos fases, se coloca el proceso de negociación, que es el núcleo de este segundo paso. El objetivo de esta etapa es la formulación y evaluación de escenarios candidatos de rehabilitación. Estos escenarios se definen como combinaciones de MAES y dentro de esta metodología se evalúan frente al conjunto de DSI definidos para este objetivo. Por lo tanto, los agentes del proceso pueden emplear este mecanismo de apoyo a la toma de decisiones que les permite comparar los escenarios candidatos y seleccionar los más adecuados.

#### **4.2.3 Etapa III – Implementación de las MAES, operación y mantenimiento**

La metodología se completa con la implementación de los trabajos de construcción y la puesta en marcha de las tecnologías implementadas, junto con la verificación del alcance de los objetivos definidos anteriormente.

Según los métodos tradicionales, en esta fase aparecen nuevos agentes para la ejecución de las obras o la gestión y el mantenimiento posteriores. Sin embargo, la metodología basada en IPD garantiza que todos los agentes estén involucrados desde las primeras fases del proceso de rehabilitación, reduciendo así los riesgos relacionados con las necesidades de rediseño por la aparición de nuevos condicionantes. En este sentido, la implementación de métodos de trabajo basados en BIM es esencial para apoyar los métodos IPD y contribuir a reducir las modificaciones en esta etapa, que derivan en un aumento de los costes.

Junto con estos aspectos, también los promotores de la intervención tienen que establecer un proceso para la monitorización de la calidad de los trabajos que permita validar que la metodología se está implementando bajo los principios anteriores y garantizar que los objetivos finalmente alcanzados sean los definidos en las fases previas.

#### **4.2.4 Etapa IV – Medida y Verificación de ahorros energéticos y plan de aceptación**

Los planes de rehabilitación energética a nivel de distrito requieren una evaluación cuidadosa debido al alto coste para implementar las MAES y las expectativas relacionadas con la reducción del uso de energía. Cabe señalar que la rehabilitación energética de un distrito podría modificar el comportamiento y las características sociales del distrito a largo plazo, lo que podría incluso resultar en un aumento del consumo de energía.

Sin embargo, los protocolos de Medida y Verificación (M&V) permiten cuantificar de manera confiable los ahorros reales (energía, coste y emisiones de gases de efecto invernadero) resultantes de una MAE. Esto se logra teniendo en cuenta todos los factores externos que han afectado el rendimiento energético y que no están relacionados con la propia medida, extrayendo estas variaciones en el consumo de energía del cálculo de ahorro real.

Por lo tanto, los ahorros se determinan comparando el uso medido antes y después de la implementación de las medidas haciendo ajustes adecuados para reflejar los cambios en las condiciones. Este concepto consta de 3 etapas:

- Antes de implementar la MAE, se selecciona un período de tiempo anterior a la implementación de la misma y se mide el uso de energía para definir el “período de referencia” (línea base) y el modelo de comportamiento energético.
- Después de implementar la MAE, se define un período de tiempo adecuado y el uso de energía se mide una vez más para definir el período “posterior a la actualización”.
- Los ahorros de energía se determinan restando el uso real medido tras la rehabilitación al consumo de la línea base ajustada.

$$\text{Ahorro Energético} = \text{Línea Base Ajustada} - \text{Consumo Real} \quad (1)$$

La verificación del impacto de las MAES en términos de ahorro de energía y demanda, así como el coste, puede abordarse mediante la adopción de protocolos de M&V adecuados. Actualmente, varios protocolos brindan información muy útil sobre M&V y se emplean para proporcionar confianza en la precisión de los ahorros basados en un riguroso proceso de medición, incorporando ajustes para cambios en los patrones de uso de energía para permitir una comparación real, y eliminar la incertidumbre de los resultados.

El Protocolo Internacional de Medición y Verificación del Comportamiento (*International Performance Measurement and Verification Protocol*, IPMVP) es el protocolo de M&V más ampliamente utilizado y reconocido en el mundo [50]. El IPMVP ha sido extensamente adoptado a nivel internacional y “se ha convertido en el protocolo de facto para la medición y verificación de contratos basados en el rendimiento energético”. Este protocolo presenta una visión general de las mejores prácticas disponibles para verificar el ahorro de energía resultante de la eficiencia energética, la conservación del agua y los proyectos de energía renovable dentro de un edificio comercial o industrial. El IPMVP proporciona definiciones y una estructura para ayudar a cualquier usuario, sin experiencia o experto, a desarrollar un plan de M&V para un proyecto.

Sin embargo, IPMVP se limita al escenario de edificios individuales, mientras que para abordar el nivel de distrito, IPMVP debe extenderse para aplicar sus principios a esta escala. Particularmente, en términos de monitorización, es estrictamente necesario alcanzar una solución rentable mientras que se garantiza un modelo de comportamiento lo suficientemente preciso como para calcular los indicadores de cara a cuantificar los ahorros debido a la implementación de las MAES. Por lo tanto, mediante la utilización de técnicas de muestreo y agregación [51], el protocolo extendido puede implementarse en distritos donde las tipologías de construcción son similares, con el objetivo de aprovechar al máximo el potencial de réplica de este método en este tipo de entornos de rehabilitación de distritos.

### **4.3 Desarrollo de una metodología de soporte a la toma de decisiones**

Dentro de los cuatro pasos que componen la metodología, el segundo de ellos supone el elemento clave donde se toman las decisiones para diseñar la alternativa que mejor cumpla con los objetivos definidos por las partes interesadas. El diseño de un proyecto de rehabilitación energética del distrito hacia DECN es un ejemplo típico de un problema de toma de decisiones multi-objetivo que abordan cuestiones en las que hay más de un objetivo y los objetivos no se pueden combinar directamente en un escenario único. Para su resolución, se plantea la utilización de técnicas de análisis multi-criterio (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) que permiten la agregación de indicadores de sostenibilidad. Según [52], “es importante seleccionar un enfoque que sea consistente con la necesidad de información del responsable de la toma de decisiones”.

Si bien los problemas de diseño basados en criterios múltiples no definen explícitamente las alternativas, y estas son infinitas e incontables (o muy grandes si son contables), en los problemas de evaluación multi-criterio, que es el caso del método de evaluación propuesto dentro de esta metodología, el espacio de soluciones consiste en un número finito de alternativas que se definen al comienzo del proceso. Estas alternativas quedan representadas por su desempeño frente a múltiples criterios, y el objetivo es identificar la mejor alternativa para ser sugerida al responsable de la toma de decisiones, o encontrar un conjunto de buenas alternativas, dependiendo de los objetivos del proyecto de decisión. Este segundo caso es el que se persigue en esta metodología: se proporciona un conjunto de buenas soluciones propuestas a los responsables de la toma de decisiones con el fin de apoyarles en el proceso de identificación de la combinación óptima que finalmente se aplicará al distrito.

Siguiendo este enfoque, se deben cubrir los siguientes pasos:

- Identificación y definición del responsable de la toma de decisiones.
- Definición de los objetivos del proyecto de decisión.
- Formulación de escenarios y selección de criterios (paso 1 en la Figura 12): que incluye el proceso de generación de alternativas de rehabilitación candidatas basadas en la combinación de Medidas de Ahorro de Energía (MAES).
- Toma de decisiones multi-criterio (paso 2 en la Figura 12): que requiere el establecimiento de los criterios de evaluación (*District Sustainability Indicators*, DSI en esta metodología), un método de normalización y un esquema de ponderación para permitir la comparación de los escenarios formulados en el paso anterior.
- Selección del escenario óptimo y diseño del proyecto (paso 3 en la Figura 12).

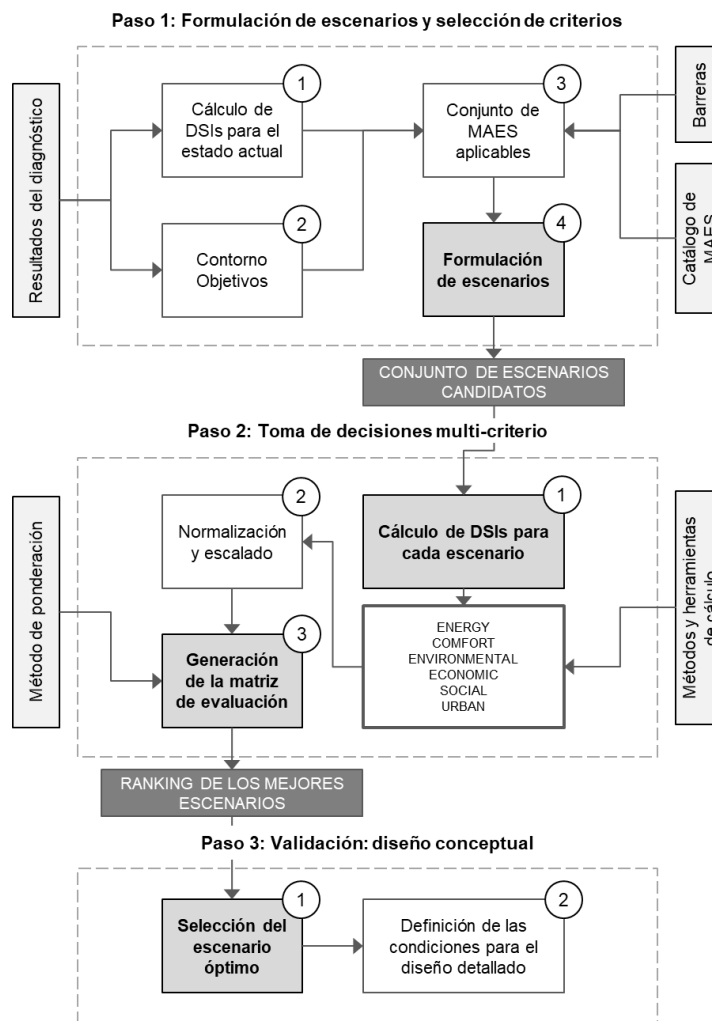


Figura 12. Pasos del proceso de soporte a la toma de decisiones.

### **4.3.1 Identificación y definición del responsable de la toma de decisiones**

De acuerdo a la metodología establecida y siguiendo los principios de IPD, se recomienda la constitución de un Equipo de Gestión de Proyectos (*Project Management Team*, PMT), generando así un comité conformado por el representante principal del Propietario, el Proyectista y el Contratista.

El peso de cada miembro del comité PMT se distribuirá equitativamente si se firma un acuerdo tripartito. Si el acuerdo entre las partes no es tripartito, el peso de la decisión se asigna atendiendo a su porcentaje de inversión total o coste total del proyecto.

Por tanto, es posible encontrar algunos participantes que pueden tener más peso en las decisiones que otros, pero siempre teniendo en cuenta que las decisiones que implican la seguridad, la salud, la propiedad y el bienestar público deben ser tomadas por un profesional capacitado para tales cuestiones según sus competencias profesionales.

Si no hay consenso entre las partes del PMT, se puede trabajar con un grupo asesor de soporte que deberá brindar apoyo con respecto a los temas correspondientes a sus áreas de especialización. Si la falta de consenso persistiera, el propietario tomará la decisión considerando el mayor interés del proyecto como un todo.

### **4.3.2 Definición del objetivo de la toma de decisiones**

Una vez que los participantes de PMT están coordinados, comienza el proceso de toma de decisiones con respecto a la definición de los objetivos del proyecto. Así, en línea con [52], “los encargados de tomar decisiones ambientales a menudo se encargan de elegir una alternativa (por ejemplo, una tecnología, material, producto o estrategia de gestión) de un conjunto de alternativas”. De esas situaciones de toma de decisiones que son habituales en los procesos de decisión acerca de cuestiones relacionadas con la sostenibilidad [53][54], en esta metodología el objetivo de la toma de decisiones es la selección de la alternativa que mejor se ajusta a una serie de condiciones establecidas de un conjunto de alternativas factibles.

Estas alternativas factibles se definen como escenarios candidatos de MAES combinadas, considerando aquellas medidas que son aplicables al distrito una vez que se evalúan las barreras, restricciones y objetivos que deben garantizarse después del proceso de la rehabilitación. El PMT se encargará de definir esos escenarios (como alternativas de medidas combinadas).

### 4.3.3 Formulación de escenarios y selección de criterios

El proceso para definir los escenarios aplicables (paso 1 en la Figura 12) puede ser bastante simple o puede resultar de gran complejidad. Esta sección presenta un método para preseleccionar (o descartar) MAES lo que permite simplificar el proceso. Esos escenarios se evalúan posteriormente mediante la utilización de la matriz de evaluación en la que se ponderan todos los indicadores y se evalúan los escenarios frente a un Índice de Sostenibilidad del Distrito, lo que permite que el PMT pueda identificar aquellos que mejor responden a las condiciones establecidas.

Intercambiador de calor integrado en cerramiento		
<b>Esquema / imagen</b>	<p>Fuente: proyecto 3encult</p>	
<b>Descripción</b>	Elemento que se puede integrar en la cara interior del cerramiento para implementar una solución de ventilación con recuperación de calor que reduce las pérdidas energéticas y mejora la calidad del aire interior. Aunque generalmente se aplica a edificios terciarios, se puede emplear en edificios residenciales reduciendo el espesor mediante la utilización de tubos planos.	
<b>Aplicación</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Vivienda <input type="checkbox"/> Edificio <input type="checkbox"/> Distrito	
<b>Ahorro energético</b>	<b>Coste</b>	<b>Ahorro emisiones CO<sub>2</sub></b>
-	-	-
<b>Requisitos estéticos</b>	Impacto visual casi inexistente al actuar en la cara interior.	
<b>Requisitos dimensionales</b>	Capa interior adicional que provoca pérdida de espacio.	
<b>Requisitos funcionales</b>	Conexión con la cara exterior del cerramiento a través de rejillas de entrada y salida.	
<b>Barreras técnicas</b>	Problema con los huecos existentes. Es necesario intervenir por el interior (actuación intrusiva). Necesidad de resolver la integración con el sistema de calefacción o refrigeración existente.	

Figura 13. Descripción de las tecnologías en el catálogo [55]

Estos escenarios son la combinación de posibles medidas de ahorro de energía que se pueden implementar para mejorar el comportamiento del distrito en términos de energía y

confort, considerando igualmente los impactos en los ámbitos económico, social o ambiental. Para ello se emplea un catálogo de soluciones que incluye tecnologías para mejorar el comportamiento del distrito, clasificadas en términos de estrategias pasivas, activas, de integración de energías renovables o medidas de control. Junto con el desarrollo de esta metodología, se generó un catálogo de soluciones [55], el cual recoge (Figura 13) para cada tecnología sus características específicas como son el coste unitario promedio, el ahorro potencial promedio de energía, etc., así como información sobre las principales barreras que aparecen al implementarlas y requisitos estéticos, dimensionales y funcionales.

Desde el catálogo de tecnologías, se implementan filtros en tres niveles para reducir el espacio de soluciones y permitir evaluar únicamente los escenarios que son viables. Los tres métodos para descartar MAES son:

- **Aplicación de umbral de veto:** a partir de los resultados que provienen del diagnóstico y el análisis de barreras, el PMT debe aplicar un umbral de veto a la amplia gama de ECM aplicables basados principalmente en barreras para su implementación, que pueden ser técnicas, sociales o económicas.
- **Evaluación previa de costes:** la información del coste promedio proporcionada en el catálogo se puede utilizar para realizar una evaluación preliminar y verificar qué combinaciones superan los límites establecidos como condiciones límite. Estos escenarios, para los cuales este cálculo previo económico supera el umbral objetivo, pueden descartarse de la evaluación reduciendo así el espacio de soluciones. Debe considerarse que el catálogo proporciona información genérica no adaptada a las condiciones económicas de cada mercado, por lo que el PMT deberá revisar y modificar esta información según resulte oportuno.
- **Evaluación previa de los beneficios:** se realiza una primera evaluación de los beneficios en términos de:
  - Ahorro energético esperado.
  - Contribución esperada de energías renovables / ahorro neto esperado en el consumo de energía fósil.

Al igual que en el caso de costes, los valores promedios ofrecidos en el catálogo dan soporte a esta pre-evaluación que permite eliminar escenarios y reducir así el espacio de soluciones.



### 4.3.4 Toma de decisiones multi-criterio

#### 4.3.4.1 Definición de los criterios de evaluación

De un número finito de escenarios o alternativas, una matriz de evaluación normalizada apoyará la comparación de estos conjuntos de combinaciones de tecnologías. Estos escenarios candidatos para la rehabilitación están representados por su comportamiento frente a múltiples criterios y por un índice único (Índice de Sostenibilidad del Distrito) que agrega los indicadores de los seis campos de evaluación (energía, confort, medioambiental, económico, social y urbano). Por lo tanto, la evaluación de los escenarios a través de estos indicadores e índices permite a las partes interesadas identificar el escenario que mejor se ajusta a los objetivos del proyecto de rehabilitación.

Así, la definición de los indicadores (DSI) es un factor clave para evaluar el comportamiento de los escenarios de rehabilitación. Estos indicadores se definen como los tipos de datos que pueden medir o simular para mostrar de manera cuantificable el comportamiento del distrito en los campos de energía, confort, condiciones ambientales, económicas, sociales y urbanas. La Tabla 6 a continuación muestra el sistema de indicadores generado para esta evaluación, así como las fases en las cuáles el indicador es utilizado, ya que algunos de ellos solo son aplicables a algunas fases. Este es, por ejemplo, el caso de indicadores que contribuyen al análisis de ciertas barreras durante la fase de diagnóstico (por ejemplo, el nivel del PIB o la tasa de empleo).

**Tabla 6.** Indicadores de Sostenibilidad de Distrito

ÍNDICE	Indicador de Sostenibilidad del Distrito (DSI)	Diagnóstico	Evaluación	Validación	
ÍNDICE ENERGÉTICO	DEN	Densidad de consumo de energía final (térmico)	X	X	X
	Efesu	Densidad de consumo de energía final (eléctrico)	X	X	X
	Pesu	Eficiencia máxima anual de los sistemas de energía	X	X	X
	PEE	Potencia máxima anual de los sistemas de energía	X	X	X
	PTH	Potencia pico de demanda eléctrica	X	X	X
	DA	Potencia pico de demanda térmica	X	X	X
	DC	Nivel de cumplimiento de estándares nacionales	X	X	X
	ESS	Nivel de auto-consumo energético	X	X	X
	NFEC	Consumo de energía de fuentes fósiles	X	X	X

ÍNDICE	Indicador de Sostenibilidad del Distrito (DSI)	Diagnóstico	Evaluación	Validación		
	MST	Cuota de mercado de la tecnología para medir el grado de innovación		X		
	TPC	Previsibilidad y capacidad de control temporal del suministro de energía	X	X		
	VT	Visibilidad de la tecnología	X	X		
ÍNDICE ECONÓMICO	INV	Inversiones	X	X		
	GRA	Subvenciones	X	X		
	LCC	Coste de ciclo de vida	X	X		
	LCPP	Periodo de amortización del ciclo de vida	X	X		
	TAR	Costes anuales totales	X	X		
	EPC	Coste de producción de la energía	X	X	X	
	NPV	Valor presente neto			X	
	IRR	Tasa de retorno interna		X	X	
	ROI	Retorno de la inversión		X	X	
	DPP	Periodo de amortización dinámico		X	X	
	ARI	Rentas conseguidas incluyendo costes auxiliares		X	X	
	ARE	Incremento de renta (excluyendo los costes auxiliares)		X	X	
	ÍNDICE DE CONFORT	PMV	Voto medio previsto (PMV)	X	X	X
		PPD	Porcentaje de insatisfacción previsto	X	X	X
LTC		Confort térmico local	X	X	X	
CAV		Valor medio del confort	X	X	X	
POR		Porcentaje fuera de rango	X	X	X	
VIS		Confort visual en áreas de lectura	X	X	X	
IAQ		Calidad del aire (Concentración de CO <sub>2</sub> )	X	X	X	
ÍNDICE SOCIAL	SDF	Aspectos socio-demográficos	X			
	HOT	Estructura de la propiedad	X			
	GDP	Nivel de PIB	X			
	EPA	Tasa de empleo	X			
	DSA	Nivel de satisfacción/aceptación de los propietarios, inquilinos o usuarios			X	
	LIP	Nivel de información			X	
	LCP	Nivel de participación			X	
	HBE	Comportamiento social activo/proactivo			X	
	ICP	Percepción interna del confort	X		X	

ÍNDICE	Indicador de Sostenibilidad del Distrito (DSI)		Diagnóstico	Evaluación	Validación	
ÍNDICE AMBIENTAL	QBU	Calidad del edificio	X	X	X	
	ACC	Nivel de accesibilidad para personas con discapacidad	X	X	X	
	IEP	Impacto en la pobreza energética	X	X	X	
	FEN	Consumo de energía final	X	X	X	
	PEN	Consumo de energía primaria	X	X	X	
	GHG	Emisiones de gases de efecto invernadero	X	X	X	
	EHS	Eco-eficiencia de sistemas híbridos	X	X	X	
	EFP	Huella ecológica	X	X	X	
	ÍNDICE URBANO	Ef	Impacto de la rehabilitación: eficiencia del sistema urbano		X	X
		H	Complejidad urbana: empresas, organizaciones civiles, asociaciones, etc.		X	X
PEE		Impacto en espacio públicos peatonales		X	X	
iT		Impacto en transporte		X	X	

Algunos de los DSI se han definido empleando diversas fuentes existentes de indicadores relacionados con la eficiencia energética en el sector de la construcción [56].

#### 4.3.4.2 Método de normalización

El método de normalización pretende transformar los criterios seleccionados, medidos en diferentes unidades, en un nuevo criterio común que siga a la misma unidad. Según [57], se pueden aplicar tres métodos diferentes, siendo el más adecuado el cambio de unidad de escala fija. Por lo tanto, es posible transformar los criterios en un marco homogéneo que pueda ser ponderado y agregado. Deben garantizarse dos factores al seleccionar el método de normalización entre todas las técnicas existentes [58]: la robustez (insensibilidad frente a la existencia de valores extremos) y la eficiencia (valor estimado cercano al óptimo esperado cuando se desconoce la distribución de datos reales) de la técnica seleccionada. En este caso, dado que no hay un muestreo representativo suficiente para usar técnicas como la puntuación z, se utilizará una normalización min-max, basada en la utilización de valores mínimos ( $X_{\min}$ ) y máximos ( $X_{\max}$ ) obtenidos a través de panel de expertos para cada criterio. Así, los valores mínimos serán sustituidos por 0, mientras que los valores máximos serán reemplazados por 1, siendo todos los valores intermedios valores relativos en el intervalo [0,1].

Las funciones de normalización min-max dependen de si el valor objetivo es el más alto (como puede ser para la producción de renovables) o si es el más bajo (demanda de energía). Cuando el valor objetivo es el máximo, la función de normalización será:

$$I_{ki} = \begin{cases} 0 & \forall X_{ki} < X_{k\_min} \\ \frac{X_{ki} - X_{k\_min}}{X_{k\_max} - X_{k\_min}} & \forall X_{k\_min} \leq X_{ki} \leq X_{k\_max} \\ 1 & \forall X_{ki} > X_{k\_max} \end{cases} \quad (2)$$

donde  $I_{ki}$  es el valor normalizado de k,  $X_{ki}$  es el valor original de este criterio, y  $X_{k\_min}$  y  $X_{k\_max}$  los valores mínimo y máximo de k, respectivamente.

Sin embargo, si el valor objetivo es un mínimo, entonces la función será:

$$I_{ki} = \begin{cases} 1 & \forall X_{ki} < X_{k\_min} \\ \frac{X_{k\_max} - X_{ki}}{X_{k\_max} - X_{k\_min}} & \forall X_{k\_min} \leq X_{ki} \leq X_{k\_max} \\ 0 & \forall X_{ki} > X_{k\_max} \end{cases} \quad (3)$$

Mediante la aplicación de este método, los valores utilizados para alimentar la matriz de evaluación se vuelven adimensionales, tomando valores en el intervalo [0,1], donde 0 representa el peor valor para el indicador (el menos sostenible) y 1 representa el mejor valor (el más sostenible).

#### 4.3.4.3 Definición del esquema de ponderación

El problema para el proceso de toma de decisiones se puede formular como una matriz de decisión que intenta identificar la alternativa  $A_i$  que maximiza el rendimiento de todo el conjunto de criterios  $C_j$ , siguiendo un procedimiento de ponderación basado en los pesos  $w_j$  establecidos, en este caso, por un grupo de expertos seleccionado.

criterios	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$	
pesos	$w_1$	$w_2$	...	$w_n$	

$$\begin{array}{c} \text{alternativas} \\ X = \end{array} \begin{array}{l} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{array} \begin{array}{l} \left( \begin{array}{cccc} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{array} \right)_{mxn} \end{array} \quad (4)$$

Dentro de esta metodología, las alternativas  $A_i$  corresponden con los escenarios de candidatos de rehabilitación que han sido formulados por las partes interesadas como una

combinación de MAES; los criterios  $C_j$  se corresponden con los indicadores contra los cuales se evalúan los escenarios (es decir, los DSI); y los pesos  $w_j$  representan la importancia dada a cada criterio calculados mediante la implementación de cuestionarios de lógica difusa distribuidos a un panel de expertos como se describe en los siguientes párrafos.

Por lo tanto, deben cubrirse cuatro etapas principales: formulación de alternativas y selección de criterios, ponderación de criterios para los indicadores y sub-indicadores, procedimiento de evaluación y tratamiento final y agregación.

Como esta metodología tiene como objetivo proporcionar una matriz de evaluación que incluya el conjunto de ponderaciones para los indicadores, se requiere un método para transformar el conocimiento de los expertos en valores cuantificables para ser integrados. Así se generó un grupo de expertos representando a varios de los agentes de la cadena de valor representando arquitectos, ingenieros, la industria (incluidas las Pymes), el mundo académico, instituciones financieras y de investigación y autoridades locales para capturar su conocimiento sobre la importancia de los indicadores.

Una vez establecido el panel de expertos, para transformar este conocimiento en valores cuantificables, se siguió el Método Delphi de Lógica Difusa. Este método consiste en una ligera modificación del Método Delphi puro [59], cuyos fundamentos son: respuesta anónima, proceso iterativo y retroalimentación controlada que proporciona una respuesta grupal estadísticamente válida. La formulación difusa propone manejar un nivel controlado de incertidumbre o ambigüedad que subyace intrínsecamente detrás del establecimiento de un valor cuantitativo exacto para reflejar la opinión de un experto. Por lo tanto, se mejora la eficiencia y la calidad de los cuestionarios.

El método Delphi difuso se puede resumir en los siguientes cuatro pasos:

- Generación de una estructura de sub-indicadores relacionados con los 6 campos de sostenibilidad (*a. Energía, b. Confort, c. Ambiental, d. Económico, e. Social y f. Urbano*).
- Recogida de las opiniones del grupo de expertos a partir de un cuestionario predefinido con los criterios seleccionados.
- Cálculo de números difusos triangulares, de acuerdo con el método propuesto por [60]. Cada número difuso representa un puntaje (a través de una escala de 1. "*muy poco importante*" a 9. "*muy importante*") para cada sub-indicador dado por cada experto en un DSI particular (Tabla 7).

- Aplicación de la des-difusión para identificar la importancia de cada sub-indicador. El método recíproco para convertir los valores difusos triangulares en una valorización exacta del peso del sub-indicador correspondiente es el proceso de des-difusión. En este caso, el método más utilizado es el Centro de gravedad [61].
- Aplicación de umbrales para eliminar pesos inútiles cuando están 25 por ciento por encima y por debajo respecto del valor medio.

**Tabla 7.** Cuestionarios de lógica difusa distribuidos a los expertos

Cuestionario para los expertos	Nada importante	Bastante poco importante	Poco importante	Casi poco importante	Neutral	Casi importante	Importante	Bastante importante	Muy importante	Representación gráfica
Importancia baja (muy claro)	c	d								
Importancia normal (claro)				a	b	d				
Importancia alta (no muy claro)						a	b	c		
Importancia normal (no muy claro)			a	b	d					
Importancia baja (no muy claro)	b	c	d							
Importancia normal (nada claro)		a	b	c	d					
Importancia alta o muy alta (bastante claro)						a	b	c		

Para identificar lo que se puede considerar como la solución óptima para el diseño del proyecto de rehabilitación, los valores de los indicadores para cada escenario calculado se integran en la matriz de evaluación, normalizándose y ponderándose de acuerdo con las ecuaciones de normalización y los pesos obtenidos a través de los métodos aquí expuestos. Por lo tanto, cada escenario candidato que caracterizado a través de un índice global que permite clasificarlo y compararlo con el resto de escenarios.

### **4.3.5 Selección del escenario: validación final**

Al decidir la mejor alternativa, se llega al final del proceso de toma de decisiones. El proceso de selección es bastante simple, ya que una vez que se obtienen los escenarios con mejor evaluación, el PMT simplemente elige la alternativa que tuvo la calificación más alta. Por lo tanto, la decisión final debe:

- Cumplir con los objetivos del proyecto.
- Reconocer todos los riesgos, barreras y / o consecuencias de la elección. También deben ser claros todos los criterios y todas las alternativas posibles.
- La preferencia es clara: se asignan valores numéricos y se establece un orden de preferencia para todos los criterios y alternativas.
- En todos los casos, la decisión final será igual o similar a los escenarios clasificados principales. Si la decisión final no coincide con los resultados obtenidos a través de la evaluación, las desviaciones deben estar justificadas.

Una vez que se toma la decisión, se inicia el proceso de redacción de los proyectos y la fase de ejecución donde las incertidumbres y modificaciones se ven reducidas considerablemente frente a modelos tradicionales gracias a la participación temprana de los agentes en las fases anteriores (según los principios de IPD y la metodología BIM) y el proceso de toma de decisiones está basado en el consenso entre las partes.

## **4.4 Resultados**

### **4.4.1 Generación de la matriz de evaluación para dar soporte a la toma de decisiones**

Como resultado de la aplicación de esta metodología, se ha desarrollado un método de evaluación que ofrece apoyo al proceso de toma de decisiones cuando se abordan proyectos de rehabilitación a nivel de distrito a través de la evaluación en base a diferentes criterios.

Además de la metodología en sí, el resultado principal es la matriz que permite la comparación de los escenarios candidatos de rehabilitación. Esta matriz permite integrar los valores de los indicadores, sus pesos y rangos de normalización para así determinar el Índice de Sostenibilidad Global del distrito que permite comparar los escenarios alternativos. Los valores tomados como mínimo y máximo para la normalización se han obtenido en tres estudios de

caso en los que se ha probado esta metodología [62], siendo uno de ellos el caso presentado en la siguiente sección.

La siguiente Tabla 8 incluye los resultados obtenidos para los pesos y rangos de los indicadores que forman la matriz de evaluación para comparar los escenarios de rehabilitación.

**Tabla 8.** Matriz de evaluación para los escenarios candidatos

CRITERIOS						
DSI	UNIDADES	PESO	RANGO		VALOR OBJETIVO	
			X <sub>min</sub>	X <sub>max</sub>		
EN1	DEN <sub>th</sub>	kWh/m <sup>2</sup> a	10,00%	60	150	0
EN2	DEN <sub>e</sub>	kWh/m <sup>2</sup> a	9,00%	10	80	0
EN3	Efesu	%	8,00%	0	100	1
EN4	Pesu	W/m <sup>2</sup>	8,00%	10	150	0
EN5	PEE	W/m <sup>2</sup>	9,00%	10	250	0
EN6	PTH	W/m <sup>2</sup>	8,00%	10	250	0
EN7	DA	%	8,00%	0	100	1
EN8	ESS	kWh/kWh	8,00%	0	1	1
EN9	NFEC	kWh/m <sup>2</sup>	9,00%	0	100	0
EN10	TPC	N/A	7,00%	0	5	1
EN11	VT	N/A	9,00%	0	5	(1)
<b>ÍNDICE DE ENERGÍA</b>			<b>20,00%</b>			
ECO1	INV	€/m <sup>2</sup>	10,00%	0	250	0
ECO2	GRA	€/m <sup>2</sup>	9,00%	0	200	1
ECO3	LCC	€/m <sup>2</sup>	10,00%	-500	2500	0
ECO4	LCPP	a	10,00%	0	30	0
ECO5	TAR	€/a	8,00%	5000	2 · 10 <sup>6</sup>	1
ECO6	EPC	€/kWh	10,00%	-0.05	0,15	0
ECO7	IRR	%	11,00%	1	100	1
ECO8	ROI	%	10,00%	1	100	0
ECO9	DPP	a	7,00%	10	200	0
ECO10	ARI	€/m <sup>2</sup> a	7,00%	15	60	0
ECO11	ARE	€/m <sup>2</sup> a	7,00%	0	200	0
<b>ÍNDICE ECONÓMICO</b>			<b>19,00%</b>			



CRITERIOS						
DSI	UNIDADES	PESO	RANGO		VALOR OBJETIVO	
			X <sub>min</sub>	X <sub>max</sub>		
CO1	PMV	n/a	13,00%	0	±3	0
CO2	PPD	%	14,00%	0	100	0
CO3	LTC	h/year	14,00%	0	100	1
CO4	CAV	scale	17,00%	0	100	1
CO5	POR	%	13,00%	0	100	0
CO6	VIS	lux	14,00%	0	150	1
CO8	IAQ	ppm CO <sub>2</sub>	15,00%	300	500	1
<b>ÍNDICE DE CONFORT</b>			<b>16,00%</b>			
SO1	QBU	n/a	50,00%	0	5	1
SO2	IEP	%	50,00%	0	100	0
<b>ÍNDICE SOCIAL</b>			<b>15,00%</b>			
ENV1	FEN	kWh/m <sup>2</sup> a	21,00%	0	300	0
ENV2	PEN	kWh/m <sup>2</sup> a	21,00%	0	500	0
ENV3	GHG	t/m <sup>2</sup> a	21,00%	0	1	0
ENV4	EFP	%	18,00%	0	100	1
ENV5	EPF	Ha / m <sup>2</sup> · a	19,00%	0	0,02	0
<b>ÍNDICE AMBIENTAL</b>			<b>17,00%</b>			
UR1	Ef	n/a	26,00%	0	100	1
UR2	H	n/a	23,00%	0	100	1
UR3	PEE	%	25,00%	0	100	1
UR4	iT	%	26,00%	0	100	1
<b>ÍNDICE URBANO</b>			<b>14,00%</b>			
<b>ÍNDICE GLOBAL DE SOSTENIBILIDAD DEL DISTRITO (GDSI)</b>			<b>100,00%</b>			

(1) Dependerá de los intereses específicos de los usuarios de los edificios. Así, el valor objetivo debe identificarse durante la etapa de diagnóstico, aunque en general la alta visibilidad puede representar una barrera para implementar la tecnología.

#### 4.4.2 Implementación a un caso de estudio: Cuatro de Marzo (Valladolid)

La metodología propuesta en este documento, y más específicamente la matriz de evaluación, se ha implementado en tres casos de estudio para validar su idoneidad y evaluar su viabilidad. Uno de estos casos de estudio es el distrito Cuatro de Marzo, en la ciudad de Valladolid.

Este distrito (Figura 10) pertenece a una de las áreas construidas en la ciudad para resolver la drástica demanda de nuevos edificios que ocurrieron en los años 50-80 en España como consecuencia de un proceso de industrialización tardío. Al igual que otros barrios construidos en esos años, se ejecutó en muy poco tiempo y siguiendo el mismo proyecto. Estos proyectos integrados siguieron los principios de la vivienda higiénica y soluciones constructivas y estéticas recurrentes, dando como resultado áreas homogéneas con tipologías que siempre son de bloques abiertos y torres. Todos estos aspectos, junto con la aplicación del lenguaje del Estilo Internacional y la precariedad tecnológica y de materiales, permiten explicar la gran cantidad de deficiencias que están presentes en estos edificios [63].

Proyectado en 1955 en la periferia, el distrito "Cuatro de Marzo" se encuentra actualmente al final del bulevar principal de Valladolid. El distrito forma parte de 6.473 viviendas promovidas en Valladolid entre 1940 y 1967 por el Instituto Nacional de la Vivienda (INV) y la Obra Sindical del Hogar (OSH). Caracterizados por una alta densidad de población (200 habitantes/Ha.) y una alta densidad de construcción (100 viviendas/Ha), los edificios son multifamiliares y multipropiedad. Además, existe una comunidad administrativa entre todos los propietarios de pisos en cada edificio para gestionar las partes comunes de los edificios. [136].



**Figura 14.** Fotografía del distrito de Cuatro de Marzo

Las siguientes secciones muestran cómo se implementó la metodología de diseño en el distrito y los principales resultados obtenidos que condujeron al diseño del proyecto de rehabilitación que se llevó a cabo en el distrito [65].

#### **4.4.2.1 Procedimiento y resultados del diagnóstico**

Se utilizaron varios métodos y herramientas para llevar a cabo el diagnóstico de las condiciones actuales del distrito como base para el diseño del proyecto de rehabilitación. Se implementaron encuestas y procesos de recopilación de datos así como ensayos mediante termografía infrarroja (para identificar puentes térmicos), ensayo de infiltraciones mediante el test *Blower Door*, encuestas a los habitantes y análisis de facturas de energía.

La principal fuente de información utilizada fue una herramienta BIM (Autodesk Revit) para modelar los edificios y sus alrededores y capturar información relevante sobre materiales, perfiles de uso, ocupación, etc. Tomando esta información, se utilizó una herramienta de simulación del comportamiento energético (Design Builder) para calcular los principales indicadores de energía, confort y medio ambiente, mientras que los procesos utilizados para recopilar información sirvieron para alimentar el resto de indicadores (económicos, sociales y urbanos). Además, se recopilaron datos relevantes para identificar las principales barreras que bloqueaban la implementación de ciertas tecnologías.

#### **4.4.2.2 Identificación y definición del responsable de la toma de decisiones**

Se estableció un comité colaborativo de Gestión del Proyecto para llevar a cabo el proceso de toma de decisiones. Este comité incluía representantes de los propietarios y un equipo de diseño. Los propietarios estuvieron representados a través del promotor municipal (apoyando la rehabilitación a través de subvenciones) y representantes de los vecinos. El equipo de diseño estaba compuesto por un experto en BIM, un experto en energía, un consultor de Análisis de Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment, LCA*) y un consultor de Coste de Ciclo de Vida (*Life Cycle Cost, LCC*). Todos estos representantes contaron con igual peso en el proceso de toma de decisiones.

Se requirieron grandes esfuerzos para implementar este marco de colaboración con objeto de involucrar a los propietarios de este distrito en el proceso de toma de decisiones, donde se requirió una gran cantidad de reuniones para informar y recopilar comentarios. Sin embargo, este proceso permitió comprender las expectativas y las barreras desde su perspectiva que, al final, permitieron adaptar el proyecto a las mismas.

En cuanto a la colaboración técnica y el uso de herramientas, todavía existe una falta de interoperabilidad que provoca en ciertas ocasiones la necesidad de duplicar información, lo que resulta en errores del proceso. En este caso particular, los modelos BIM actuaron como la

columna vertebral de la información, mientras que los modelos de energía se crearon en base a la información contenida en el anterior. El esfuerzo adicional requerido para crear los modelos BIM durante esta etapa se compensa en las etapas posteriores, donde las incertidumbres y los costes derivados de las modificaciones tardías se reducen drásticamente.

#### **4.4.2.3 Definición del objetivo de la toma de decisiones**

Todos los agentes mencionados anteriormente analizaron y definieron las principales barreras basadas en aspectos tecnológicos, legales o económicos, así como los objetivos principales del proyecto como base para la preselección de MAES de cara a generar los escenarios candidatos de rehabilitación a ser evaluados.

Por lo tanto, los objetivos en términos de ahorro de energía, inversión máxima, así como la identificación de tecnologías no aptas para ser implementadas, fueron el resultado principal de esta etapa en la que la colaboración entre las partes interesadas fue esencial para fijar estas condiciones de contorno.

#### **4.4.2.4 Formulación de escenarios y selección de criterios**

Como resultado de lo anterior, se seleccionó previamente un conjunto de 16 MAES que posteriormente se redujo a 8 tras de la implementación de los filtros que permitieron eliminar esas medidas que no cumplen con las expectativas o las barreras existentes. Las medidas se seleccionaron en los tres campos de aplicación (medidas pasivas, medidas activas y fuentes de energía renovables). Estas MAES se combinaron en un conjunto de 4 escenarios diferentes que las agregaron en un proceso aditivo. Las MAES seleccionados fueron los siguientes:

- ECM1 - Pasivo – sistema de aislamiento térmico por el exterior de 60 mm
- ECM2 - Pasivo – sistema de aislamiento térmico por el exterior de 100 mm
- ECM3 - Pasivo – cambio de ventanas
- ECM4 - Pasivo – aislamiento de la cara inferior del forjado de última planta
- ECM5 - Activo – modificación del sistema de iluminación
- ECM6 - Activo – cambio de calderas a sistema de condensación de baja temperatura
- ECM7 - RES – colectores solares con termosifón
- ECM8 - RES – instalación fotovoltaica en pérgola de aparcamiento

La combinación de MAES en los escenarios se resume en la Tabla 9 a continuación:

**Tabla 9.** Generación de escenarios para la rehabilitación de Cuatro de Marzo.

Escenario	Fachada	Ventanas	Cubierta	Calefacción y ACS	Iluminación	Renovables térmicas	Renovables eléctricas
1	ECM1						
2	ECM1	ECM4					
3	ECM3	ECM4	ECM5		ECM5		
4	ECM3	ECM4	ECM5	ECM6	ECM5	ECM8	ECM9

#### 4.4.2.5 Toma de decisiones multi-criterio

Para todos estos 4 escenarios, se calcularon los valores de los DSI mediante el uso de Energy Plus para el cálculo de los indicadores de energía y confort y un conjunto de algoritmos para calcular los indicadores sociales, económicos, ambientales y urbanos. Estos indicadores se introdujeron posteriormente en la matriz de evaluación que los normaliza en función de los valores min-max indicados en la Tabla 8, lo que permite establecer una clasificación de los escenarios en función del Índice de Sostenibilidad del Distrito. La siguiente Tabla 10 muestra los resultados de estos escenarios.

Como se muestra en la tabla, el escenario 4 se clasificó con el Índice de Sustentabilidad Global del Distrito más alto basado en la evaluación en base a los DSI en las seis categorías de energía, económica, confort, social, ambiental y urbano.

**Tabla 10.** Resultado de los índices para los escenarios planteados para la rehabilitación en Cuatro de Marzo

Escenario	Índice de energía	Índice económico	Índice de confort	Índice social	Índice ambiental	Índice urbano	Índice global sostenibilidad	Ranking
1	0.409	0.62	0.342	0.54	0.01	0.409	0.321	4th
2	0.437	0.577	0.425	0.54	0.24	0.437	0.402	3rd
3	0.508	0.572	0.345	0.541	0.543	0.508	0.533	2nd
4	0.463	0.511	0.347	0.541	0.714	0.463	0.566	1st

#### 4.4.2.6 Diseño conceptual

Basado en lo anterior, el escenario 4 fue el finalmente seleccionado, proporcionando los resultados que se muestran en la Tabla 11 que compara los valores previstos después de la intervención con los valores de la línea base calculados durante la etapa de diagnóstico.

**Tabla 11.** Indicadores de sostenibilidad del distrito para el estado actual y el estado tras la rehabilitación.

	<b>Indicador de Sostenibilidad del Distrito (DSI)</b>	<b>Unidades</b>	<b>Línea base</b>	<b>Valor post</b>	
<b>ÍNDICE ENERGÉTICO</b>	DEN <sub>th</sub>	Densidad de consumo de energía final (térmico)	kWh/m <sup>2</sup> a	123.05	47.03
	DEN <sub>e</sub>	Densidad de consumo de energía final (eléctrico)	kWh/m <sup>2</sup> a	5.22	3.13
	Efesu	Eficiencia máxima anual de los sistemas de energía	%	16.63	6.64
	Pesu	Potencia máxima anual de los sistemas de energía	W/m <sup>2</sup>	0.53	0.76
	PEE	Potencia pico de demanda eléctrica	W/m <sup>2</sup>	11.95	4.56
	PTH	Potencia pico de demanda térmica	W/m <sup>2</sup>	81.84	69.44
	DA	Nivel de cumplimiento de estándares nacionales	%	461.20	117.83
	ESS	Nivel de auto-consumo energético	kWh/kWh	0.00	95
	NFEC	Consumo de energía de fuentes fósiles	kWh/m <sup>2</sup>	128.27	29.91
	TPC	Previsibilidad y capacidad de control temporal del suministro de energía	n/a	0.00	1.67
VT	Visibilidad de la tecnología	n/a	0.00	1.80	
<b>ÍNDICE ECONÓMICO</b>	INV	Inversiones	€/m <sup>2</sup>	0.00	132.34
	GRA	Subvenciones	€/m <sup>2</sup>	0	0
	LCC	Coste de ciclo de vida	€/m <sup>2</sup>	-286	-84
	LCPP	Periodo de amortización del ciclo de vida	a	-704	-223
	TAR	Costes anuales totales	€/a	n.a.	7.7
	EPC	Coste de producción de la energía	€/kWh	0	109,037
	IRR	Tasa de retorno interna	%	0.107	0.015
	ROI	Retorno de la inversión	%	n.a.	11.6
	DPP	Periodo de amortización dinámico	a	n.a.	85.2
	ARI	Rentas conseguidas incl. costes auxiliares	€/m <sup>2</sup> a	n.a.	23.7
ARE	Incremento de renta (excluyendo costes auxiliares)	€/m <sup>2</sup> a	45	60	

	Indicador de Sostenibilidad del Distrito (DSI)		Unidades	Línea base	Valor post
ÍNDICE DE CONFORT	PMV	Voto medio previsto (PMV)	n/a	-1.92	-1.47
	PPD	Porcentaje de insatisfacción previsto	%	72.94	49.14
	LTC	Confort térmico local	h/year	2219	2010
	CAV	Valor medio del confort	scale	C	C
	POR	Porcentaje fuera de rango	%	76.01	68.84
	VIS	Confort visual en áreas de lectura	lux	208.72	231.91
	IAQ	Calidad del aire (Concentración de CO <sub>2</sub> )	ppm CO <sub>2</sub>	300.2	300.2
ÍNDICE SOCIAL	ACC	Nivel de accesibilidad para personas con discapacidad	n/a	71.63	92.50
	IEP	Impacto en la pobreza energética	%	4.43	2.53
ÍNDICE AMBIENTAL	FEN	Consumo de energía final	kWh/m <sup>2</sup> a	128.27	50.16
	PEN	Consumo de energía primaria	kWh/m <sup>2</sup> a	137.90	48.37
	GHG	Emisiones de gases de efecto invernadero	t/m <sup>2</sup> a	0.0383	0.0201
	EHS	Eco-eficiencia de sistemas híbridos	%	n.a.	481
	EFP	Huella ecológica	Ha / m <sup>2</sup> · a	130.23	69.02
ÍNDICE URBANO	Ef	Impacto de la rehabilitación: eficiencia del sistema urbano	n/a	0.00	145.47
	H	Complejidad urbana: empresas, organizaciones civiles, asociaciones, etc.	n/a	13.49	13.49
	PEE	Impacto en espacio públicos peatonales	%	43.36	43.27
	iT	Impacto en transporte	%	30.9	30.9

## 4.5 Discusión y conclusiones

La metodología propuesta, basada en el uso de un enfoque de toma de decisiones multi-criterio y combinada con procesos de trabajo colaborativos, puede mejorar toda la cadena de valor con el objetivo de reducir los costes y el tiempo de todo el proceso. Estos beneficios, unidos a la consideración de una escala más amplia, permiten identificar los escenarios de rehabilitación óptimos desde el punto de vista de su viabilidad técnica y económica.

El uso de esta metodología holística e integrada para apoyar el diseño de proyectos de rehabilitación energética a nivel de distrito incrementa la eficiencia de todo el proceso de diseño y ejecución. Al mismo tiempo, puede garantizar que los diferentes agentes a lo largo de toda la cadena de valor obtengan mayores beneficios, mediante el ahorro de recursos y la mejora de la eficiencia del proceso.

Esta metodología es capaz de evaluar la complejidad del distrito en términos de las características específicas asociadas a cada componente de su morfología (edificios, áreas urbanas, sistemas de energía) proporcionando soluciones integradas para implementar la mejor combinación de medidas de ahorro de energía de acuerdo con la tipología de los edificios, barreras, marco regulatorio, etc.

Una de sus características se basa en el hecho de que puede ayudar a establecer consenso en todo el proceso de toma de decisiones, incluso con actores externos que no participan directamente en él. El uso de herramientas basadas en BIM puede aumentar en gran medida el impacto y la claridad al presentar las modificaciones propuestas a las partes interesadas y los responsables de la toma de decisiones.

Además, la adopción de este método holístico basado en un enfoque de diseño colaborativo también puede ayudar a aumentar la confianza de los inversores. La metodología contribuye a esto a través de fomentar inversiones más inteligentes, reduciendo la incertidumbre inherente de que los fondos se utilizarán de manera apropiada para lograr una mejora óptima del distrito y sus edificios garantizando la mejora de la sostenibilidad.

Soluciones holísticas, con una visión conjunta para la rehabilitación del distrito, contribuyen a hacer que las inversiones, públicas y privadas, sean más atractivas. Este aspecto, junto con el resto de elementos de la metodología propuesta, contribuye a mejorar la capacidad de las autoridades locales en toda Europa para fomentar la implementación de soluciones integrales y más informadas, así como a una mejor comprensión del comportamiento del distrito después de la intervención y a mejorar los procedimientos de toma de decisiones basados en el consenso a través de la implementación del enfoque de IPD.

Con base en estos principios, este trabajo presenta un método de soporte a la toma de decisiones basado en la captura de conocimiento experto para crear una matriz de comparación que permite evaluar alternativas de diseño para proyectos de rehabilitación a escala de distrito. Esta matriz de evaluación se alimenta a través del cálculo de un conjunto de indicadores para el distrito para cada una de las alternativas candidatas, utilizando un método de normalización y agregación que permite clasificar los escenarios según los criterios utilizados.

Se trata así de un método útil que puede apoyar el proceso de toma de decisiones, que, sin embargo, presenta ciertas debilidades como una flexibilidad relativamente baja y un cierto nivel de incertidumbre mediante un esquema de ponderación fijo y umbrales de valores mínimos y máximos para los criterios que pueden no capturar todos los casos.



Por otro lado, el método que ha llevado a establecer este esquema de normalización y ponderación puede ser fácilmente replicado por las partes interesadas de cualquier proceso de rehabilitación, lo que puede permitir la adaptación del esquema a las condiciones particulares de cada proyecto específico.

Al mismo tiempo, el potencial para estandarizar este método es considerablemente alto. Esto podría llevar a la integración de herramientas que pueden automatizar algunos de los procesos para generar los escenarios candidatos o alimentar el cálculo de los indicadores. Estos desarrollos potenciales pueden agregar un alto valor a la cadena de valor del proceso de rehabilitación.

Al mismo tiempo, la metodología podría ampliarse aún más para incluir no solo acciones relacionadas con la eficiencia energética, sino también otros aspectos que podrían contribuir a mejorar la sostenibilidad del distrito. Algunos de estos campos como el transporte, el agua o la gestión de residuos también podrían evaluarse ampliando la metodología para agregar los indicadores y las herramientas de evaluación adecuadas.

La implementación de esta metodología dentro del caso de estudio que se muestra en este artículo ha permitido evaluar una variedad de escenarios formulados por los interesados, y seleccionar entre ellos el más adecuado en términos de un Índice Global de Sostenibilidad del Distrito.

Esta validación ha demostrado que la metodología es ciertamente útil para dar soporte a las partes interesadas en el proceso de toma de decisiones más informadas basadas en una amplia gama de indicadores calculados a nivel de distrito. Sin embargo, la fuerte falta de interoperabilidad entre las herramientas todavía hace que el proceso para evaluar los escenarios candidatos o capturar la información sobre las tecnologías sea tedioso y lento.

Estas debilidades se pueden reducir a través del desarrollo de un marco de interoperabilidad entre las herramientas que pueden apoyar la interacción entre las partes interesadas, sus procesos y sus objetivos dentro de la cadena de valor de la rehabilitación.

## **ARTÍCULO 2:**

Marco de evaluación como soporte a la optimización de escenarios de rehabilitación energética de edificios a escala de barrio



## 5 Marco de evaluación como soporte a la optimización de escenarios de rehabilitación energética a escala de barrio

### 5.1 Introducción

Como establece la Estrategia de Energía 2020, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la Unión Europea (UE) solo se puede lograr si se aborda adecuadamente el gran potencial existente al aumentar la eficiencia energética [67]. Esto es particularmente relevante en el entorno construido, donde se pueden lograr grandes ahorros de energía [68].

Sin embargo, todavía existe una serie de retos que deben abordarse debido a la ineficiencia de las prácticas actuales, ya que suelen menospreciar aspectos como las interacciones entre edificios, compensaciones o sinergias. Además de la cuestión de considerar los edificios como parte de un sistema más complejo, existe el desafío de evaluar los parámetros relacionados con la eficiencia energética o la sostenibilidad, que generalmente se centran demasiado en un aspecto muy específico, como el consumo de energía e ignoran otros parámetros e impactos relevantes [69]. Esta evaluación, que se lleva a cabo mediante el uso de herramientas de simulación, da como resultado diferentes niveles de precisión, pero generalmente “implica la generación de modelos de simulación ad hoc” [70]. Este proceso siempre es propenso a errores humanos, no solo al crear los modelos de simulación, sino también al incorporar medidas de ahorro energético. Así, debido a la complejidad del problema y dado que este proceso es tedioso y consume mucho tiempo, generalmente se considera un conjunto reducido de tecnologías, “lo que dificulta la posibilidad de encontrar una solución de rehabilitación óptima” [71].

Además, el sector de la construcción se está moviendo lentamente hacia un nuevo paradigma basado en enfoques más colaborativos entre los agentes involucrados, como la creación de Modelos de Información de los Edificios (BIM) [72] y la Gestión Integrada del

Proyecto (IPD) [73] con el objetivo de crear mejores mecanismos para el intercambio de información y, además de esto, ofrecer procesos más efectivos y reducir costes.

En este contexto, se ha desarrollado una herramienta que ofrece una solución colaborativa “para la rehabilitación energética a escala de distrito” [74], integrando los siguientes elementos para abordar los problemas descritos anteriormente:

- **Evaluación a escala de distrito:** la herramienta considera la interacción entre los edificios y analiza el potencial existente al considerar el distrito en su conjunto mientras que evalúa la interacción entre edificios, tanto en términos de relaciones pasivas como activas. Esto se realiza mediante la implementación de herramientas que enriquecen los modelos mediante la adición de las sombras que afectan a los edificios en estudio [75] con el fin de realizar una evaluación adecuada a nivel de distrito. Al mismo tiempo, se proponen tecnologías a nivel de distrito, explotando las sinergias entre los edificios en términos de compartir sistemas de energía y producción de energía renovable [76].
- **Uso de Técnicas de Análisis de Decisión Multi-Criterio:** el marco de evaluación se basa en la evaluación del comportamiento de los escenarios candidatos en función de un conjunto de criterios en diferentes campos, ofreciendo una evaluación más integral y una toma de decisiones más informada.
- **Catálogo de medidas de ahorro de energía (MAES):** la herramienta proporciona un amplio catálogo de tecnologías existentes que se pueden implementar a diferentes escalas (vivienda, edificio, distrito) y diferentes campos (pasivo, activo, energías renovables o estrategias de control).
- **Uso de estándares:** uso de formatos de archivo estándar para el modelado de los edificios (Industry Foundation Classes, IFC) [77] y la escala de distrito (CityGML) [78], para garantizar la implementación de un enfoque colaborativo y la interoperabilidad entre los diferentes componentes y herramientas.
- **Interoperabilidad:** el uso de estándares y la generación de un Modelo de Datos del Distrito aseguran la interoperabilidad entre las herramientas que se han integrado para los procesos de generación, evaluación y optimización de los escenarios candidatos de rehabilitación energética.

- **Uso de la Gestión Integrada del Proyecto (IPD):** la herramienta fomenta la implementación de enfoques más colaborativos como IPD para garantizar decisiones más informadas y procesos mejorados en comparación con el proceso tradicional [73].

Teniendo en cuenta todos estos elementos, la herramienta OptEEmAL proporciona cuatro procesos en una solución integrada en torno a un marco de interoperabilidad para garantizar el uso y la explotación adecuada de los datos. Estos procesos son:

- **Inserción de datos (1).** Los usuarios de la herramienta insertan los datos requeridos para realizar la evaluación de la línea de base y permitir la generación de los escenarios candidatos de rehabilitación.
- **Integración de datos y cálculo de línea de base (2).** Después de que los usuarios hayan insertado los datos, la herramienta OptEEmAL genera la primera instancia del modelo de datos (línea base) y calcula los valores de los indicadores relevantes para caracterizar su rendimiento. Para esto, se crea y procesa un conjunto de modelos de simulación a través de herramientas de simulación para generar y procesar estos indicadores que se calculan a nivel de distrito.
- **Proceso de generación y optimización de escenarios (3).** Una vez que se calcula la línea base, la herramienta genera un conjunto de escenarios candidatos de rehabilitación energética basados en la implementación de medidas de ahorro energético en el modelo de la línea base. Estos modelos se calculan a través de las herramientas de simulación integradas en la herramienta y proporcionan los indicadores que caracterizan su rendimiento. Así, se generan y evalúan grupos de escenarios hasta que se cumplen una serie de criterios de parada establecidos.
- **Exportación de resultados (4).** Después de calcular los mejores escenarios, estos se presentan a los usuarios de la herramienta que pueden seleccionar el más adecuado y exportar todos los datos que se han producido para el mismo.

Estos cuatro procesos integrados permiten implementar decisiones más informadas y reducir el tiempo y los costes del proceso de diseño, lo que también tiene un impacto en las etapas posteriores del proceso. Un elemento central en el diseño y desarrollo de la herramienta OptEEmAL es el papel y la integración de los usuarios y la forma de transformar su juicio subjetivo acerca de la priorización de los criterios en un problema matemático para dar soporte a la optimización de los escenarios de rehabilitación.

Como se indica anteriormente, una de las novedades de la herramienta presentada es el hecho de que aborda el problema del diseño y la optimización a escala de distrito, analizando por lo tanto los efectos entre edificios. Esto se realiza en términos de tres procesos principales: a) los indicadores se calculan y agregan a nivel de distrito para que la optimización permita realizar el balance del distrito en su conjunto, b) para garantizar que las simulaciones sean conscientes del distrito, se consideran los efectos del entorno circundante, y c) el catálogo incluye sistemas de energía a escala de distrito para garantizar que las tecnologías propuestas no solo optimicen el rendimiento del edificio, sino también el rendimiento del distrito.

El cálculo de los indicadores a escala de distrito se realiza mediante la agregación de indicadores en los niveles inferiores (zona térmica, edificio, etc.) Estos se calculan mediante las herramientas integradas dentro de la plataforma OptEEmAL y luego se implementan técnicas de pos-procesado y agregación para construir los indicadores de comportamiento del distrito que se utilizan para abordar la estrategia de optimización presentada en este artículo.

Con respecto a la simulación y evaluación de los efectos entre edificios, estos ocurren principalmente a nivel pasivo y activo, lo que corresponde con la evaluación del efecto que tienen los edificios entre sí, y con la integración de MAES a escala de distrito respectivamente. Para garantizar que los efectos se modelen y se calculen adecuadamente, se ha implementado una herramienta de Generación de Sombras Colindantes (*District Neighbouring Shadows*, DNS) que utiliza un algoritmo desarrollado para determinar el conjunto de superficies que impiden que la energía solar alcance a los edificios simulados [75]. Esta herramienta recibe la información proveniente de los modelos IFC y CityGML y luego, basándose en variables de entrada como la latitud, la longitud y la identificación de los edificios en estudio, proporciona la geometría de las superficies de sombreado como un archivo XML [79]. Este archivo se utiliza para enriquecer el modelo original a través de un conjunto de procesos de enriquecimiento geométrico que no solo incluyen la adición de superficies sombreadas, sino también otra información como los límites de espacios de segundo nivel [80] que permiten completar cierta información no incluida dentro el archivo IFC original con objeto de proporcionar a las herramientas de simulación la información adecuada sobre las superficies poligonales del edificio a través de las cuales se intercambia la energía térmica [81].

Para garantizar que también se tengan en cuenta los efectos activos entre edificios, el catálogo desarrollado dentro de la herramienta para generar los escenarios candidatos de rehabilitación contiene medidas estructuradas en diferentes niveles, que van desde la zona térmica hasta el nivel del distrito. Las MAES incluidas a nivel de distrito consideran el balance

térmico y eléctrico del distrito a través de la integración de sistemas que producen energía localmente y la distribuyen entre los edificios del distrito. Las medidas térmicas propuestas incluyen básicamente redes de calor donde se consideran dos enfoques: bien la intervención sobre las redes existentes o la implementación de nuevas redes para cubrir la menor demanda térmica de los edificios (después de la implementación de medidas pasivas). Para el consumo eléctrico, se considera que los edificios con mayor potencial de integración de renovables en términos de geometría y orientación maximizan la producción.

Este artículo proporciona una visión general de la plataforma desarrollada (Sección 5.2), y posteriormente se centra en la metodología seguida para implementar el procedimiento de evaluación que transforma los requisitos de los usuarios para configurar el problema de optimización (Sección 5.3). A continuación, se muestra un caso simple en un entorno controlado para evaluar este procedimiento de evaluación (Sección 5.4), que ha permitido extraer los principales resultados y conclusiones (Secciones 5.5 y 5.6, respectivamente). Cabe señalar que no es objeto de este artículo la evaluación completa de la herramienta. Los resultados que se muestran aquí son la base para evaluar el método de evaluación como base para poder extender el problema a complejidades más amplias en términos de geometrías consideradas, interacciones entre edificios y MAES.

## **5.2 La aproximación de OptEEmAL**

Como se muestra en la siguiente Figura 15, la herramienta OptEEmAL se ha diseñado para integrar cinco procesos que responden a los pasos explicados anteriormente y con el objetivo general de ofrecer las funcionalidades necesarias para apoyar la toma de decisiones al diseñar proyectos de rehabilitación energética de distritos.

### **5.2.1 Definición del problema**

De acuerdo con la descripción en la sección anterior, el proceso comienza con la inserción de los datos necesarios para definir la línea base (IFC, CityGML, datos contextuales y otros datos relacionados con el proyecto) y con la definición de los objetivos, barreras, objetivos o umbrales por parte del usuario para que la herramienta pueda proponer y evaluar las alternativas de rehabilitación en base a esta información [83]. Además, antes de lanzar la generación automática de escenarios, simulación y optimización, la herramienta ofrece al usuario la lista de medidas de ahorro de energía a considerar en el problema de optimización con objeto de que se revise y edite si es necesario. Además, los usuarios pueden establecer



objetivos y límites para hacer más precisa la definición de escenarios. Esta información se inserta junto con los criterios de priorización tal como se explica en el proceso de evaluación presentado en este artículo y detallado en las secciones a continuación.

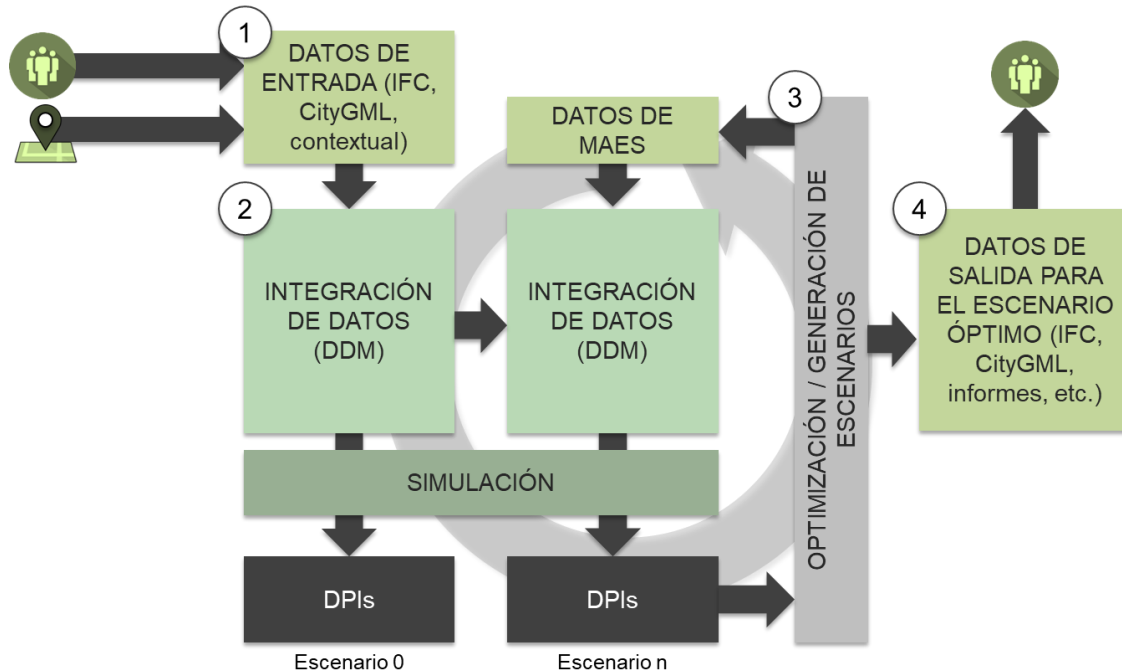


Figura 15. Proceso desplegado en la herramienta. Adaptado de [82].

### 5.2.2 Simulación y cálculo de los indicadores de comportamiento del distrito para la línea base

Los modelos de simulación de la línea base son procesados por un conjunto de herramientas de simulación que se utilizan para el cálculo de los 42 indicadores que definen el marco de evaluación. Dependiendo del indicador que se calcule, se utiliza una herramienta diferente: “los Indicadores de Comportamiento del Distrito (*District Performance Indicators*, DPIs) de energía se calculan con los resultados ofrecidos por las herramientas de simulación externas Energy Plus®” [84] y “una herramienta desarrollada específicamente para ser integrada en OptEEmAL que permite simular los sistemas de energía y las estrategias de control propuestas” [85], mientras que “los DPI ambientales se calculan mediante el uso de la herramienta NEST®” [86]. La combinación de algunos de estos indicadores permite el cálculo de otros. Una vez que se han ejecutado los modelos de simulación, los resultados se agregan y resultan en los valores de los 42 indicadores a nivel de distrito.

### 5.2.3 Generación de escenarios a través de un catálogo de MAES

Después de la generación y simulación de la línea base de acuerdo con el proceso descrito anteriormente, la herramienta presenta al usuario los valores de los indicadores de ese estado inicial y se inicia un proceso iterativo de generación y optimización de escenarios. Así, se crean diferentes escenarios a través de la aplicación de una o más MAES del catálogo al escenario de referencia.

Estos se asignan al modelo de simulación que representa la línea base y posteriormente se procesan con el conjunto de herramientas de simulación para calcular los indicadores tal como sucede para la simulación de la línea base. De esta manera, los modelos de simulación para los escenarios se ejecutan, y los DPIs para cada escenario candidato de rehabilitación se almacenan dentro de la plataforma.

### 5.2.4 Evaluación y optimización

El método de evaluación implementado dentro de la plataforma tiene como objetivo traducir una serie de criterios cualitativos en cuantitativos, que “es el tema de investigación del análisis de decisiones multi-criterio” (MCDA) [87] [88]. Así, las técnicas de MCDA se pueden emplear para crear un marco para la toma de decisiones al evaluar alternativas para diseñar una solución de rehabilitación que analice un conjunto de criterios de evaluación (en este caso, indicadores calculados a nivel de distrito).

El uso de un método de ponderación es el procedimiento habitual, pero aunque existen algunas referencias como en estándares ISO [89], no existe un consenso sobre el método de agregación a emplear. Además, también hay una serie de aspectos clave que deben resolverse al implementar este tipo de enfoques de toma de decisiones [90]. Algunos de estos aspectos son, por ejemplo, definir los criterios de evaluación, normalizar y escalar los indicadores o definir los objetivos y los esquemas de ponderación.

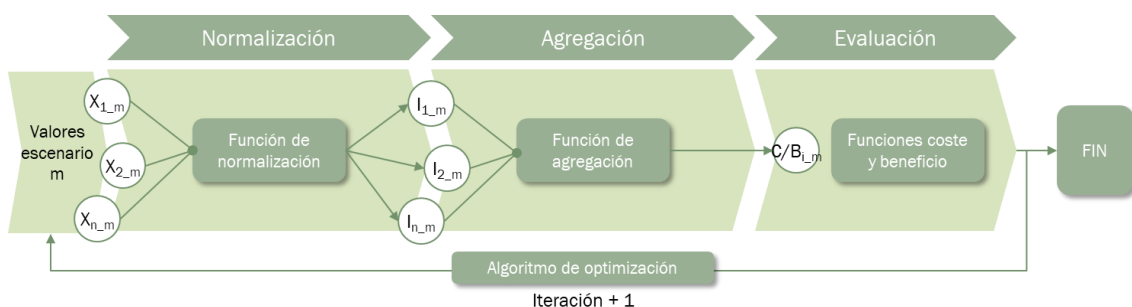


Figura 16. Esquema del proceso de evaluación.

La solución propuesta por esta metodología de evaluación es la que se refleja en la Figura 16 anterior. Este proceso considera primero la normalización de los criterios de evaluación para hacerlos comparables, luego se implementa un método de agregación para calcular dos funciones: la que representa el coste y la que refleja el beneficio, que permite ordenar los escenarios y compararlos con objeto de seleccionar los más adecuados para los objetivos definidos por el responsable de la toma de decisiones.

Un algoritmo de optimización de búsqueda de armonía (*Harmony Search Algorithm*) permite establecer un proceso de generación de escenarios y evaluarlos en términos de las funciones de coste y beneficio [91]. Este algoritmo genera nuevas iteraciones en forma de grupos de escenarios candidatos de rehabilitación, que se crean en función de los resultados que se obtienen de la ejecución anterior y, por lo tanto, los optimiza en un bucle continuo.

### 5.2.5 Búsqueda de los escenarios óptimos

El proceso de optimización ocurre en un ciclo donde se generan y evalúan nuevos escenarios y se detiene cuando se cumplen una serie de criterios de parada establecidos. Estos criterios se definen a través de la información de entrada proporcionada por los usuarios en términos de objetivos y umbrales límite para el problema de optimización.

Una vez que esto sucede, el usuario puede visualizar un conjunto de los mejores escenarios representados en un frente de Pareto donde se muestran los parámetros que permiten caracterizar su comportamiento y las MAES aplicadas en cada uno de ellos, y luego seleccionar y exportar los resultados del escenario seleccionado.

## 5.3 Metodología

Un problema de optimización se define como “aquel que pretende encontrar las soluciones óptimas o casi óptimas con respecto a una serie de objetivos y se traduce en una función objetivo” [92].

Esta función puede ser bi-objetivo (basada en la optimización de dos indicadores al mismo tiempo), o considerar más dimensiones siendo, por lo tanto, una función objetivo multi-criterio. Estos dos métodos también se pueden combinar, donde los indicadores se pueden agrupar para representar índices compuestos que pueden caracterizar el rendimiento de los edificios o el distrito que se va a adaptar.

La selección del método depende en gran medida de cómo el responsable de la toma de decisiones formule el problema y de establecer adecuadamente la importancia de los criterios que se utilizan para la evaluación. Por lo tanto, dentro de esta metodología, la función objetivo depende del esquema de priorización establecido para representar la importancia de cada DPI.

### 5.3.1 Selección de los criterios de evaluación

El método implementado dentro de este marco considera los principios de IPD (definición del responsable de la toma de decisiones) para el proceso de toma de decisiones, donde los criterios de evaluación se definen como DPIs. El sistema de evaluación desarrollado considera 42 DPI que cubren seis campos relevantes. Sin embargo, para facilitar la evaluación integral del comportamiento de un distrito, la lista que se utilizará para la evaluación se concentró en 18 de estos indicadores “después de haber analizado si eran atributos naturales o fácilmente medibles, atributos construidos, que fusionan varios atributos naturales, o atributos habilitantes (criterios de evaluación)”, como se sugiere en [93].

Estos 18 indicadores se han agregado en un grupo que representa los beneficios y otro que representa los costes. Además, se ha creado una tercera categoría dentro del grupo de beneficios para facilitar el establecimiento de los criterios de priorización, como se explica en la siguiente sección. Por lo tanto, los criterios de evaluación se dividen en:

- **Grupo de costes:** este grupo contiene los DPI que indican el coste del escenario (coste ambiental o económico).
- **Grupo de beneficios 1:** este grupo incluye los DPI que implican un beneficio para el escenario (reducción de la demanda o consumo de energía, aumento del porcentaje de energía cubierta por fuentes renovables, aumento del confort, etc.)
- **Grupo de beneficios 2:** este grupo tiene en cuenta los beneficios obtenidos al aumentar la contribución de las energías renovables: fotovoltaica, solar térmica, hidráulica, mini-eólica, geotérmica y biomasa. Es un subgrupo del Grupo de Beneficios 1, ya que representa una desagregación del indicador que mide el porcentaje de energía cubierta por fuentes renovables (ENE09).

La Tabla 12 muestra los DPI incluidos en cada uno de estos grupos, donde el grupo ENV corresponde a los indicadores ambientales, ECO a los aspectos económicos, ENE a aquellos relacionados con la energía y COM a aquellos que representan aspectos relacionados con el confort del distrito.

Cabe señalar que la numeración de los indicadores no es correlativa, ya que son una selección de la lista de los 42 indicadores utilizados dentro de la herramienta OptEEmAL para caracterizar el comportamiento del distrito como se menciona anteriormente.

**Tabla 12.** Lista de Indicadores de Comportamiento del Distrito (DPIs) para cada grupo.

Grupo 1 – costes	Grupo 2 (beneficios 1)	Grupo 3 (beneficios 2)
ENV01.Potencial de calentamiento global - GWP (kg CO <sub>2</sub> )	ENE 01.Demanda energética	ENE 14.Uso de energía de biomasa
ENV04.Consumo de energía primaria	ENE02.Consumo de energía final	ENE 15.Uso de energía de fotovoltaica
ENV06.Periodo de amortización de energía	ENE 06.Consumo de energía de fuentes fósiles	ENE 16.Uso de energía de solar térmica
ECO02.2 Inversión (€)	ENE 09.Porcentaje de energía final cubierta con renovables	ENE 17.Uso de energía de hidráulica
ECO03.Coste de ciclo de vida	ENE 13.Uso de energía de redes de calor	ENE 18.Uso de energía de mini-eólica
ECO05.Periodo de amortización	COM01.Confort térmico local	ENE 19.Uso de energía de geotermia

### 5.3.2 Definición del problema de optimización

La optimización multi-objetivo, también llamada optimización de criterios múltiples, se puede definir como “el problema de encontrar un vector de solución que satisfaga las restricciones del proyecto introducidas y optimice una función vectorial cuyos elementos representan funciones objetivo individuales” [94]. Estas funciones forman una descripción matemática de los criterios de comportamiento (DPI). Por lo tanto, el término “optimizar” significa encontrar dicho vector de solución (escenario de rehabilitación) que daría los valores mejores valores de los DPI de acuerdo con los objetivos y umbrales predefinidos.

Formalmente, un problema de optimización multi-objetivo se define como aquel que busca el vector de solución  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  que optimiza el vector de comportamiento del distrito, definido como:

$$D(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x})]^T \quad (1)$$

En otras palabras, el objetivo es determinar entre el conjunto de todos los escenarios de rehabilitación factibles que satisfagan las restricciones, el conjunto particular  $\mathbf{x}$  que produce los valores óptimos de los DPI seleccionados definidos en la ecuación  $f(\mathbf{x})$ .

Se debe tener en cuenta que, en general, no hay un solo punto que optimice el conjunto de funciones objetivas, por lo que se considera un conjunto de soluciones óptimas no dominadas o la aproximación del conjunto de Pareto. Por lo tanto, la noción de “óptimo” varía con respecto a los enfoques mono-objetivos, cuyo objetivo es lograr una solución única que cumpla simultáneamente con las limitaciones y proporcione el mejor valor para la función objetivo. En aproximaciones multi-objetivo, el vector solución  $\mathbf{x}$  es óptimo en el frente de Pareto si no existe otro  $\mathbf{x}$ , para el que  $f_i(\mathbf{x}) \leq f_i(\mathbf{x})$  para todo  $i \in \{1, \dots, n\}$  y  $f_j(\mathbf{x}) < f_j(\mathbf{x})$  para al menos un valor de  $j$ .

Esta definición significa que  $\mathbf{x}$  es óptimo de Pareto si no existe un vector factible de variables de decisión que disminuya algún criterio sin causar un aumento simultáneo en al menos otro criterio. La gráfica de las funciones objetivas cuyos vectores no dominados están en el conjunto óptimo de Pareto se llama el frente de Pareto [95]. En el enfoque de esta metodología y como se indica anteriormente, los criterios de evaluación se han dividido en tres grupos que representan los costes el primero y los beneficios el segundo y el tercero (siendo este último una subcategoría del segundo). Por lo tanto, el problema de optimización aquí es el que tiene como objetivo encontrar el conjunto  $\mathbf{x}$  que minimiza los costes (considerando no solo los costes económicos sino también los costes ambientales o sociales) y maximiza los beneficios, que se trazan para encontrar los óptimos contenidos en el frente de Pareto.

Sin embargo, para encontrar los valores de coste y beneficio para cada escenario candidato de rehabilitación, se debe llevar a cabo una agregación ponderada de los indicadores que representan estos dos índices, donde los pesos deben representar los criterios de priorización establecidos por los agentes del proceso de rehabilitación.

### **5.3.3 Constucción de la función coste-beneficio**

#### **5.3.3.1 Definición de un método de ponderación**

Según [93], los métodos de ponderación (en este caso para resolver problemas de diseño de proyectos de rehabilitación energética) se pueden clasificar en cuatro grupos principales, que son: aproximaciones indirectas mediante la selección de uno o varios indicadores, métodos de monetización en los que los impactos ambientales se traducen en unidades monetarias, métodos de distancia al objetivo o métodos de panel.

El marco de evaluación implementado dentro de esta herramienta sigue el enfoque del método del panel y se implementa a través de dos métodos. En el primero, los usuarios pueden

comparar la importancia de los indicadores por pares para evitar que estén condicionados por su interpretación de todo el esquema y puedan realizar una comparación más precisa. El segundo permite al usuario seleccionar un esquema de ponderación predefinido que ha sido desarrollado e implementado dentro de la herramienta por un grupo de expertos que utilizan la comparación por pares de indicadores para un conjunto de objetivos estableciendo un escenario de prioridad como puede ser la reducción global de consumos, de emisiones o la optimización de los costes de operación.

### 5.3.3.2 Normalización y escalada

Existen muchas técnicas de normalización y de acuerdo con [96], “tanto la robustez (insensibilidad frente a la existencia de valores extremos) como la eficiencia (valor estimado cercano al óptimo esperado cuando se desconoce la distribución de datos reales) deben equilibrarse”. Mediante la aplicación de la normalización, los valores utilizados para alimentar la matriz de evaluación se convertirán en no dimensionales, tomando todos valores en el intervalo [0,1], y donde en todos ellos 0 representa el peor valor para el indicador (el menos sostenible) y 1 representa el mejor valor (el más sostenible).

La normalización tiene como objetivo transformar los valores actuales para cada criterio que se mide bajo diferentes unidades, en un nuevo criterio común que utiliza la misma unidad. Según [97], se pueden aplicar tres métodos diferentes, siendo el más adecuado la transformación en una escala fija. El método de normalización en esta metodología pretende reducir la cantidad de subjetividad en el proceso haciendo uso de los resultados derivados del cálculo del escenario de referencia. Por lo tanto, en lugar de fijar los valores mínimos y máximos para implementar una normalización min-max<sup>5</sup>, se utilizan valores relativos en comparación con la situación de referencia.

Luego, dado que la mayoría de los DPI miden los ahorros obtenidos en cada categoría (por ejemplo, “ahorros en el consumo de energía” medidos del 0% al 100%), esto puede relacionarse fácilmente con el mejor valor posible, que es un 100% de ahorro = “1”, mientras que el peor valor (“0”) sería un 0% de ahorro.

Sin embargo, no todos los DPI pueden calcularse como ahorros en relación con la situación de referencia (como, por ejemplo, la inversión), utilizando en estos casos los valores

---

<sup>5</sup> Como es el caso de la normalización implementada en versión previa de la metodología que se presenta en el artículo anterior.

proporcionados por los agentes del proceso como condición de umbral límite para transformar los criterios en un marco homogéneo que pueda ser ponderado y agregado.

### 5.3.3.3 Composición de un método de panel: el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP)

Los métodos de panel para obtener los criterios dependen en gran medida del método seleccionado (cuestionarios, entrevistas o discusiones grupales), composición del panel (expertos, inexpertos o partes interesadas), procedimiento (ronda única, Delphi) y resultado (consenso, análisis estadístico de resultados) [98]. En el caso de este método de evaluación, y de acuerdo con los principios de IPD, el panel estará compuesto por las partes interesadas que se articularán a través del contrato de IPD, y debe dar lugar a un consenso para obtener los parámetros de ponderación.

Hay varios métodos de panel que se pueden implementar, siendo los más relevantes: la calificación directa, el método de tarjetas de Simos, la clasificación de criterios, la comparación por pares (por ejemplo, en el proceso de jerarquía analítica, AHP) y la teoría clásica de valor múlti-atributo (MAVT) que puede adaptarse para otros procedimientos [99].

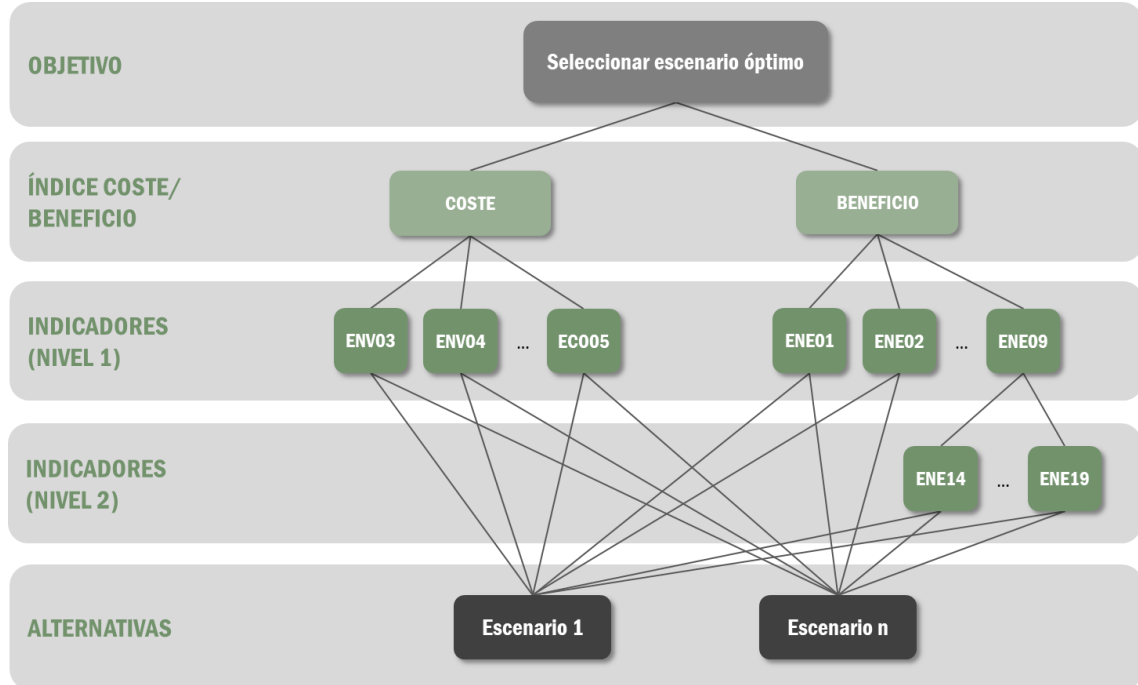


Figura 17. Jerarquía del proceso de toma de decisiones.

El esquema principal de un proceso de jerarquía analítica (AHP) se presenta en la Figura 17, que establece que [100]: “un proceso de toma de decisiones puede descomponerse en 4 pasos: definir el objetivo, estructurar la jerarquía de decisiones, construir un conjunto de



matrices de comparación por pares y utilizar las prioridades obtenidas de la comparación para ponderar las prioridades en el nivel inmediatamente inferior”.

El proceso AHP es un método bien conocido que sirve para establecer la relevancia de cada criterio a través de su comparación por par. Como lo demuestra el estado de la técnica, es un método consistente que puede usarse para resolver diferentes problemas de toma de decisiones. En este caso, el problema a resolver es la selección del mejor escenario de las alternativas a través de la consideración de las prioridades de los agentes del proceso.

Por lo tanto, el sistema desarrollado propone e integra una estrategia de comparación por pares que permite generar un esquema de ponderación mediante la comparación de parejas de criterios principales con respecto al índice de coste / beneficio y los sub-criterios (nivel 2 de indicadores) con respecto al criterio ENE09.

**Tabla 13.** Escala fundamental de números absolutos. Adaptado de [101]

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Misma importancia	Dos criterios contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente un criterio sobre el otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen considerablemente un criterio sobre el otro
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Un criterio es muy considerablemente importante que el otro; su dominancia se ha demostrado en la práctica
9	Importancia extrema	La evidencia posiciona un criterio como el más importante respecto del otro
Recíprocos de los anteriores	La importancia de cada indicador (i) respecto de aquel con el que se ha comparado (j) es el valor recíproco del segundo (j) sobre el primero (i)	

Los valores relacionados con la intensidad de importancia, de acuerdo con [101], “deben establecerse por consenso del panel de toma de decisiones (o panel de expertos para esquemas de ponderación fija), en el que se le pide a cada participante individualmente que compare el criterio en un método por pares que establece si un criterio es más importante que el par y por cuánto”. La Tabla 13 muestra la escala de números utilizada para reflejar la intensidad de importancia de los indicadores.

Siguiendo este enfoque, el proceso considera la construcción de las matrices de comparación por pares que pueden establecer la relevancia de cada criterio para un objetivo definido. En este método de evaluación, hay tres matrices que permiten comparar:

- Matriz de comparación por pares de los seis criterios ambientales y económicos con respecto al coste.
- Matriz de comparación por pares de los seis criterios de energía y confort con respecto al beneficio.
- Matriz de comparación por pares de los seis criterios para las energías renovables con respecto a ENE09.

La Tabla 14, la Tabla 15 y la Tabla 16 muestran estas matrices de comparación.

Según AHP, esta matriz es recíproca, lo que significa que al comparar cada criterio contra sí mismo el resultado es 1, mientras que las comparaciones a la derecha de la diagonal son las inversas de las ubicadas a la izquierda de la diagonal.

**Tabla 14.** Matrices de comparación por pares. Matriz 1 (coste)

<b>MATRIZ 1: COSTE</b>	<b>ENV03</b>	<b>ENV04</b>	<b>ENV06</b>	<b>ECO02</b>	<b>ECO03</b>	<b>ECO05</b>
<b>ENV03</b>	1	ENV03/ ENV04	ENV03/ ENV06	ENV03/ ECO02	ENV03/ ECO03	ENV03/ ECO05
<b>ENV04</b>	ENV04/ ENV03	1	ENV04/ ENV06	ENV04/ ECO02	ENV04/ ECO03	ENV04/ ECO05
<b>ENV06</b>	ENV06/ ENV03	ENV06/ ENV04	1	ENV06/ ECO02	ENV06/ ECO03	ENV06/ ECO05
<b>ECO02</b>	ECO02/ ENV03	ECO02/ ENV04	ECO02/ ENV06	1	ECO02/ ECO03	ECO02/ ECO05
<b>ECO03</b>	ECO03/ ENV03	ECO03/ ENV04	ECO03/ ENV06	ECO03/ ECO02	1	ECO03/ ECO05
<b>ECO05</b>	ECO05/ ENV03	ECO05/ ENV04	ECO05/ ENV06	ECO05/ ECO02	ECO05/ ECO03	1

**Tabla 15.** Matrices de comparación por pares. Matriz 2 (beneficios – nivel 1)

<b>MATRIZ 2: BENEFICIO 1</b>	<b>ENE01</b>	<b>ENE02</b>	<b>ENE06</b>	<b>ENE09</b>	<b>ENE13</b>	<b>COM01</b>
<b>ENE01</b>	1	ENE01/ ENE02	ENE01/ ENE06	ENE01/ ENE09	ENE01/ ENE13	ENE01/ COM01
<b>ENE02</b>	ENE02/ ENE01	1	ENE02/ ENE06	ENE02/ ENE09	ENE02/ ENE13	ENE02/ COM01
<b>ENE06</b>	ENE06/ ENE01	ENE06/ ENE02	1	ENE06/ ENE09	ENE06/ ENE13	ENE06/ COM01
<b>ENE09</b>	ENE09/ ENE01	ENE09/ ENE02	ENE09/ ENE06	1	ENE09/ ENE13	ENE09/ COM01
<b>ENE13</b>	ENE13/ ENE01	ENE13/ ENE02	ENE13/ ENE06	ENE13/ ENE09	1	ENE13/ COM01
<b>COM01</b>	COM01/ ENE01	COM01/ ENE02	COM01/ ENE06	COM01/ ENE09	COM01/ ENE13	1

**Tabla 16.** Matrices de comparación por pares. Matriz 3 (beneficios – nivel 2)

<b>MATRIZ 3: BENEFICIO 2</b>	<b>ENE14</b>	<b>ENE15</b>	<b>ENE16</b>	<b>ENE17</b>	<b>ENE18</b>	<b>ENE19</b>
<b>ENE14</b>	1	ENE14/ ENE15	ENE14/ ENE16	ENE14/ ENE17	ENE14/ ENE18	ENE14/ ENE19
<b>ENE15</b>	ENE15/ ENE14	1	ENE15/ ENE16	ENE15/ ENE17	ENE15/ ENE18	ENE15/ ENE19
<b>ENE16</b>	ENE16/ ENE14	ENE16/ ENE15	1	ENE16/ ENE17	ENE16/ ENE18	ENE16/ ENE19
<b>ENE17</b>	ENE17/ ENE14	ENE17/ ENE15	ENE17/ ENE16	1	ENE17/ ENE18	ENE17/ ENE19
<b>ENE18</b>	ENE18/ ENE14	ENE18/ ENE15	ENE18/ ENE16	ENE18/ ENE17	1	ENE18/ ENE19
<b>ENE19</b>	ENE19/ ENE14	ENE19/ ENE15	ENE19/ ENE16	ENE19/ ENE17	ENE19/ ENE18	1

Después de generar las matrices de comparación, “el peso de cada indicador se calcula resolviendo el auto-vector de la matriz, que se basa en un proceso de tres pasos” [102]:

- La matriz tiene que elevarse a potencias cuadradas sucesivamente cada vez.
- La suma de las filas se calcula y luego se normaliza.
- Una vez que la diferencia entre las sumas de dos cálculos consecutivos es menor que un valor que se ha definido, el cálculo se detiene.

Los valores del peso son la suma de las filas de esta matriz.

Este proceso permite obtener los pesos de cada criterio y luego construir las funciones de coste y beneficio. La siguiente ecuación refleja el ejemplo de la matriz del grupo de costes:

$$\begin{bmatrix} w_{ENV03} \\ w_{ENV04} \\ w_{ENV06} \\ w_{ECO02} \\ w_{ECO03} \\ w_{ECO05} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{ENV01}{ENV04} & \frac{ENV01}{ENV06} & \frac{ENV01}{ECO02} & \frac{ENV01}{ECO03} & \frac{ENV01}{ECO05} \\ \frac{ENV04}{ENV01} & 1 & \frac{ENV06}{ENV04} & \frac{ECO02}{ENV04} & \frac{ECO03}{ENV04} & \frac{ECO05}{ENV04} \\ \frac{ENV06}{ENV01} & \frac{ENV06}{ENV04} & 1 & \frac{ECO02}{ENV06} & \frac{ECO03}{ENV06} & \frac{ECO05}{ENV06} \\ \frac{ECO02}{ENV01} & \frac{ECO02}{ENV04} & \frac{ECO02}{ENV06} & 1 & \frac{ECO03}{ECO02} & \frac{ECO05}{ECO02} \\ \frac{ECO03}{ENV01} & \frac{ECO03}{ENV04} & \frac{ECO03}{ENV06} & \frac{ECO03}{ECO03} & 1 & \frac{ECO05}{ECO03} \\ \frac{ECO05}{ENV01} & \frac{ECO05}{ENV04} & \frac{ECO05}{ENV06} & \frac{ECO05}{ECO05} & \frac{ECO05}{ECO05} & 1 \end{bmatrix}^8 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 5.3.3.4 Función coste-beneficio

Como se muestra arriba, el objetivo principal, por lo tanto, es establecer las funciones de coste-beneficio  $D(x)$  que se optimizarán para que se pueda encontrar el conjunto  $x$  para minimizar el coste y maximizar el beneficio, y donde este conjunto  $x$  se representa a través de un conjunto de soluciones en el frente de Pareto.

La siguiente Tabla 17 resume la agregación de los indicadores siguiendo el enfoque expuesto en las secciones anteriores para construir esta función de coste-beneficio:

**Tabla 17.** Ponderación de indicadores para generar las funciones coste-beneficio

Código DPI	Peso ( $w_i$ )	Rango		Objetivo	DPI para escenario $x$ $f_i(x)$	DPI normalizado para escenario $x$ $I_i(x)$	DPI ponderado y normalizado
		min ( $f_{i,min}$ )	max ( $f_{i,max}$ )				
ENE <sub>i</sub>	$w_{ENEi}$	0	100	1	$f_{ENEi}(x)$	$I_{ENEi}(x) = \frac{f_{ENEi}(x)}{100}$	$w_{ENEi} \cdot I_{ENEi}(x)$
COM <sub>i</sub>	$w_{COMi}$	0	100	1	$f_{COMi}(x)$	$I_{COMi}(x) = \frac{f_{COMi}(x)}{100}$	$w_{COMi} \cdot I_{COMi}(x)$
ECO <sub>i</sub>	$w_{ECOi}$	0	$f_{ECOi,max}$	0	$f_{ECOi}(x)$	$I_{ECOi}(x) = 1 - \frac{f_{ECOi}(x)}{100}$	$w_{ECOi} \cdot I_{ECOi}(x)$
ENV <sub>i</sub>	$w_{ENVi}$	0	100	1	$f_{ENVi}(x)$	$I_{ENVi}(x) = \frac{f_{ENVi}(x)}{100}$	$w_{ENVi} \cdot I_{ENVi}(x)$

Por lo tanto, las funciones beneficio (3) y coste (4) se pueden formular de la siguiente manera:

$$B(x) = \sum_{i=1}^n w_{ENEi} \cdot I_{ENEi}(x) + \sum_{i=1}^n w_{COMi} \cdot I_{COMi}(x) \quad (3)$$

$$C(x) = \sum_{i=1}^n w_{ECOi} \cdot I_{ECOi}(x) + \sum_{i=1}^n w_{ENVi} \cdot I_{ENVi}(x) \quad (4)$$

Estas funciones representan el comportamiento del distrito para cada escenario y son las que deben optimizarse para encontrar el conjunto de los mejores escenarios de acuerdo con los criterios de priorización que se han insertado como pesos para los indicadores.

## 5.4 Caso de estudio: validación del método de evaluación en un entorno controlado

El método de evaluación presentado en este documento se ha implementado dentro de un componente software de evaluación que toma los datos de entrada necesarios para realizar la evaluación y proporciona el frente de Pareto para optimizar los escenarios de rehabilitación.

Como datos de entrada para la evaluación, se requieren los resultados de los DPIs de diagnóstico (línea base), los resultados de los DPIs de evaluación (asociados a cada escenario candidato) y los objetivos, umbrales límite y pesos establecidos por los agentes del proceso. Como resultado, este componente (evaluador) proporciona las funciones de coste y beneficio y los valores de DPI fuera de los umbrales, así como la lista de objetivos alcanzados.

Para validar el evaluador y la metodología de evaluación, se llevó a cabo un caso de estudio dentro de un entorno controlado. Dado que se trate una validación aislada, es importante tener en cuenta los siguientes aspectos con respecto al caso:

- Las MAES seleccionadas para crear los escenarios se obtuvieron del catálogo de MAES desarrollado para la herramienta.
- Los escenarios considerados se generaron siguiendo la inteligencia implementada en el generador de escenarios descrito al comienzo de este documento, considerando las restricciones establecidas por el usuario.
- El cálculo de los DPI de la línea base y el escenario se rehabilitación siguieron el proceso normal y operativo de la plataforma (es decir, con el evaluador integrado dentro de ella) y, por lo tanto, los datos se almacenaron en y se recogieron de los repositorios correspondientes de la herramienta.
- También se obtuvieron los esquemas de ponderación, objetivos y barreras de los repositorios correspondientes, es decir, los esquemas de ponderación predefinidos ya estaban disponibles dentro de ellos.

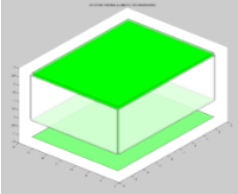
### 5.4.1 Descripción del caso de estudio

La validación se realizó en función de los resultados obtenidos en un caso simple que se creó para este fin, como se muestra en la tabla a continuación (Tabla 18).

Para generar los escenarios, se han combinado un total de 14 MAES para crear 178 escenarios que combinan las medidas. Las medidas seleccionadas son las siguientes:

- 4 tipos de aislamiento térmico exterior con 4 tipos de espesores de aislamiento (50-100-150-200 mm)
- 4 tipos de aislamiento térmico interior con 4 tipos de espesores de aislamiento (40-60-80-100 mm)
- 4 tipos de aislamiento térmico de cubierta con 4 tipos de espesores de aislamiento (40-60-80-100 mm)
- Sustitución del sistema de calefacción existente con la instalación de una caldera de gas natural.
- Instalación de paneles fotovoltaicos en cubierta.

**Tabla 18.** Descripción del caso de estudio.

Propiedad	Valor	Imagen
Superficie	Superficie fachada: 75.60 m <sup>2</sup>	
	Superficie cubierta: 48.00 m <sup>2</sup>	
Espacios	1	
Elementos	4 fachadas	
	1 cubiertas	
	0 ventanas	

La lógica empleada para generar los 178 escenarios candidatos de rehabilitación consideró diferentes combinaciones de las medidas enumeradas anteriormente. En primer lugar, cada medida pasiva se consideró por separado, y a continuación a cada medida pasiva individual se agregó una medida activa o renovable. A continuación, se exploró la combinación de medidas pasivas (aislamiento externo / interno + cubierta), considerando la restricción de no implementar aislamiento interno y externo al mismo tiempo. Y, por último, también se agregaron las medidas activas y renovables. La lista de escenarios considerados se muestra en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Lista de escenarios generados para la validación.

Escenario	Número	Concepto	
1	1	R	Cada medida renovable (R) por separado
2	1	A	Cada medida active (A) por separado
3-14	12	P	Cada medida pasiva (P) por separado
15-26	12	P + R	Cada medida pasiva (P) por separado + renovables (R)
27-38	12	P + A	Cada medida pasiva (P) por separado + activas (A)
39-50	12	P + A + R	Cada medida pasiva (P) por separado + renovables (R) + activas (A)
51-66	16	(P ext) + (P roof)	Medidas pasivas externas (P ext) + aislamiento de cubierta (P roof)
67-82	16	(P ext) + (P roof) + R	Medidas pasivas externas (P ext) + aislamiento de cubierta (P roof) + renovables (R)
83-98	16	(P ext) + (P roof) + A	Medidas pasivas externas (P ext) + aislamiento de cubierta (P roof) + activas (A)
99-114	16	(P ext) + (P roof) + A + R	Medidas pasivas externas (P ext) + aislamiento de cubierta (P roof) + activas (A) + renovables (R)
115-130	16	(P int) + (P roof)	Medidas pasivas internas (Pint) + aislamiento de cubierta (P roof)
131-146	16	(P int) + (P roof) + R	Medidas pasivas internas (Pint) + aislamiento de cubierta (P roof) + renovables (R)
147-162	16	(P int) + (P roof) + A	Medidas pasivas internas (Pint) + aislamiento de cubierta (P roof) + activas (A)
163-178	16	(P int) + (P roof) + A + R	Medidas pasivas internas (Pint) + aislamiento de cubierta (P roof) + activas (A) + renovables (R)

#### 5.4.2 Cálculo de los DPIs para la línea base y para los escenarios

Los DPI de referencia y para los escenarios que se utilizan en el evaluador y que de otro modo serían proporcionados por el módulo de simulación de la herramienta [103] se calcularon manualmente en este caso utilizando herramientas específicas. Estas herramientas se muestran en la Tabla 20. Para cada DPI se define su tipo: C (coste), B (1) (beneficio 1) y B (2) (beneficio 2).

**Tabla 20.** Lista de herramientas empleadas para el cálculo de los indicadores.

Tipo	Nombre	Herramienta
C	ENV01: Potencial de calentamiento global	NEST
C	ENV04: Consumo de energía primaria	
C	ENV06: Periodo de amortización de energía	
C	ECO02.2: Inversión	Herramienta generada ad-hoc para evaluación económica
C	ECO03: Coste de ciclo de vida	
C	ECO05: Periodo de amortización	
B (1)	ENE01: Demanda energética	
B (1)	ENE02.0: Consumo de energía final	Energy Plus y herramienta generada ad-hoc para simulación de sistemas de energía y control
B (1)	ENE06: Consumo de energía fósil	
B (1)	ENE09: Porcentaje de energía final cubierta por renovables	
B (1)	ENE13: Uso de energía de redes de calor	
B (1)	COM01: Confort térmico local	
B (2)	ENE14: Uso de energía de biomasa	
B (2)	ENE15: Uso de energía de fotovoltaica	
B (2)	ENE16: Uso de energía de solar térmica	
B (2)	ENE17: Uso de energía hidráulica	
B (2)	ENE18: Uso de energía mini-eólica	
B (2)	ENE19: Uso de energía geotérmica	

### 5.4.3 Definición del sistema de ponderación, objetivos, condiciones de contorno y cálculo de valores de coste y beneficio

El evaluador hace uso de la información introducida por el usuario en la fase inicial de definición del problema y condiciones de contorno. En esta fase se establecen límites y criterios de priorización. En este caso, la definición de objetivos y umbrales límite ha sido la siguiente:

- Umbrales límite:
  - ENV06 (máximo): 50
  - ECO02.2 (máximo): 15.000€
  - ECO05 (máximo): 30
  - ENV01 (máximo): 50
- Objetivos:
  - ENV06 (minimizar): 25



- ECO05 (minimizar): 20
- ENE09 (maximizar): 50

Para los criterios de priorización, se desplegaron un total de 14 esquemas de ponderación predefinidos [104]. En ellos, los pesos se asignan a cada DPI de acuerdo con el objetivo final que tiene el usuario. La lista completa de los esquemas de ponderación generados es la siguiente:

- **Esquema 1:** prioridad para lograr un distrito de energía casi nulo
- **Esquema 1A:** prioridad para lograr un distrito de energía casi nulo + aspectos económicos
- **Esquema 2:** prioridad para lograr un distrito neutro en carbono
- **Esquema 2A:** prioridad para lograr un distrito neutro en carbono + aspectos económicos
- **Esquema 3:** prioridad a la generación de energía a través de energías renovables
- **Esquema 3A:** prioridad a la generación de energía a través de energías renovables + aspectos económicos
- **Esquema 4:** prioridad a la generación de energía a través de energías renovables (solar térmica y fotovoltaica)
- **Esquema 4A:** prioridad a la generación de energía a través de energías renovables (solar térmica y fotovoltaica) + aspectos económicos
- **Esquema 5:** prioridad a la generación de energía a través de redes de calor
- **Esquema 5A:** prioridad a la generación de energía a través de redes de calor
- **Esquema 6:** prioridad a los aspectos medioambientales
- **Esquema 6A:** prioridad a los aspectos medioambientales + aspectos económicos
- **Esquema 7:** prioridad para reducir los costes operativos de energía
- **Esquema 7A:** prioridad para reducir los costes operativos de energía + aspectos económicos

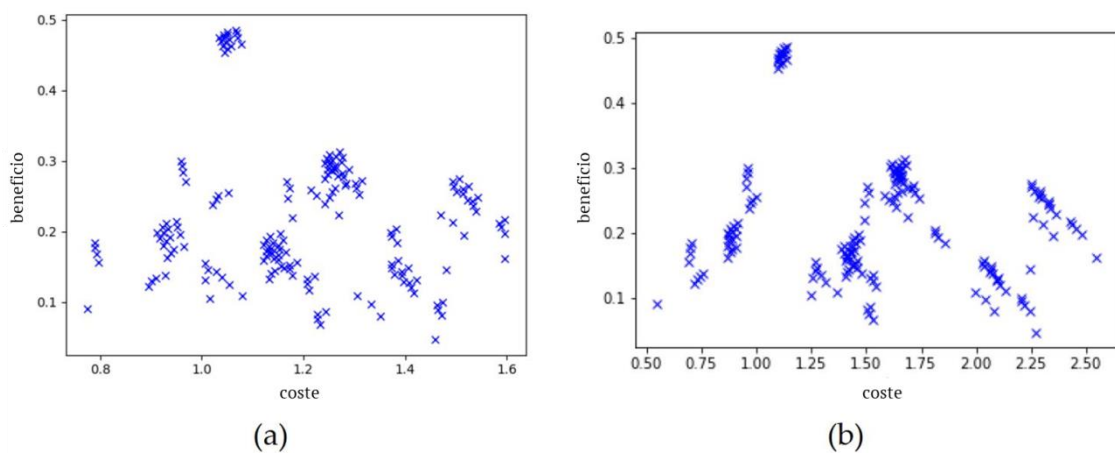
En esta validación los esquemas empleados para la validación han sido los siguientes: 1, 1A, 2, 2A, 3, 3A y 6A. Estos esquemas suponen una representación suficientemente amplia del espectro de posibilidades incluidas como objetivos en el método de evaluación.

## 5.5 Resultados y discusión

Esta sección muestra los resultados obtenidos a través de la validación del evaluador que compara los 178 escenarios candidatos de rehabilitación generados mediante el uso de los siete esquemas de priorización descritos anteriormente. Esta validación cubre tanto la observación de los gráficos de costes y beneficios como el frente de Pareto.

### 5.5.1 Observación de los gráficos de coste y beneficio

Los resultados de coste y beneficio de los escenarios antes mencionados de acuerdo con los esquemas predefinidos se analizaron en primer lugar observando los gráficos formados por los escenarios. Se han comparado entre esquemas predefinidos similares. En este artículo se muestra el análisis realizado en tres pares de esquemas predefinidos más el esquema 6A con objeto de observar las diferentes distribuciones de puntos y el efecto que los esquemas de ponderación tienen en los resultados. Los escenarios presentados a continuación corresponden a los escenarios 1 y 1A, 2 y 2A, 3 y 3A y 6A. La siguiente Figura 18 muestra los escenarios 1 y 1A.



**Figura 18.** Esquemas de ponderación pre-definidos 2 (distrito de energía casi nula) (a) y esquema pre-definido 2A (distrito de energía casi nula + consideraciones económicas) (b).

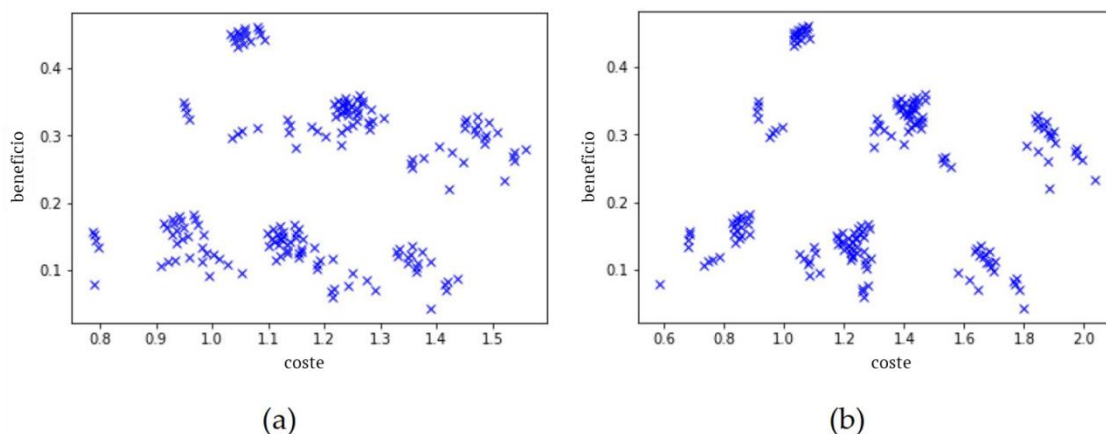
Al comparar los gráficos obtenidos con el esquema predefinido 1 y con el esquema predefinido 1A, se puede observar que existe un conjunto de escenarios que presenta valores de beneficio mucho más altos que el resto en ambos casos, lo que corresponde con los escenarios donde todas las medidas se aplican al mismo tiempo. La mayoría de los escenarios presentados tienen valores de beneficio más bajos que 0.3, donde los valores de beneficio más altos los obtienen aquellos en los que se aplica una medida renovable. Además, en este grupo los costes

más altos se obtienen con escenarios en los que se aplican juntas medidas de aislamiento térmico por el exterior y en cubiertas e integración de energías renovables.

Los conjuntos de escenarios se pueden identificar fácilmente, especialmente en el segundo caso (1A). La razón de esto puede estar en el mayor peso asignado a los DPI económicos, lo que hace que los resultados de coste y beneficio sean más dependientes de ellos y, por lo tanto, más dependientes del coste de cada medida.

En cuanto a la distribución de los escenarios, en los dos esquemas es muy similar, pero en el caso del esquema 1A, los escenarios están más dispersos en el eje x (coste) debido a que este esquema pone más énfasis en el coste económico.

El segundo par de escenarios (2 y 2A) corresponde a un esquema de prioridad para lograr un distrito neutro en carbono. La distribución de escenarios se muestra en la siguiente Figura 19. Como se puede observar dentro de los gráficos, hay un conjunto de escenarios que presentan valores de beneficios mucho más altos que el resto en ambos casos. Estos corresponden a aquellos que han incluido medidas de aislamiento térmico interior y en cubierta, medidas activas e integración de renovables, aplicadas de manera integrada. Hay un escenario que se vuelve invariable, con los valores más bajos de coste y beneficio, que corresponde a la aplicación de una sola medida activa.



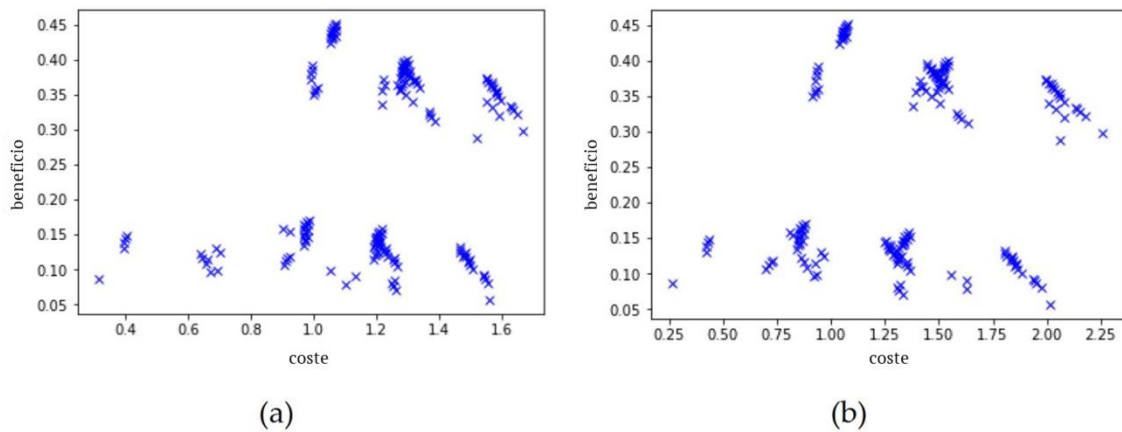
**Figura 19.** Esquemas de ponderación pre-definidos 2 (distrito neutro en carbono) (a) y esquema pre-definido 2A (distrito neutro en carbono + consideraciones económicas) (b).

Además, se puede observar que los valores de beneficio cubren un rango más amplio que en el primer caso, pero aparecen tres filas principales: la fila superior corresponde a los escenarios en los que todas las MAES se aplican juntas; la fila central donde se aplica una medida renovable en combinación con otras (P + R, P + A + R, (P ext) + (P cubierta) + R, (P ext) + (P cubierta) + A + R, o (P int) + (P cubierta) + R); mientras que en la fila inferior se puede

encontrar el resto de los escenarios (pasivas por separado, P + A, Pext + Prueba, (P ext) + (P cubierta) + A, (P int) + (P cubierta), (P int) + (P cubierta) + A).

Al comparar estos dos escenarios con el anterior (1 y 1A), se puede observar que la distribución de puntos varía, donde los valores de coste y beneficio correspondientes a los escenarios donde el aislamiento por el exterior y en cubierta en combinación con medidas activas y renovables se desplazan a la parte superior, obteniendo los valores de beneficio más altos. Este cambio puede provenir del mayor peso dado en estos esquemas de priorización a la energía fósil neta consumida (ENE06) y el porcentaje de energía cubierta por fuentes renovables (ENE09), lo que hace que los escenarios donde se aplican medidas renovables sean más favorables y, por lo tanto, aumentando sus beneficios.

El tercer par de escenarios comparados corresponde a 3 y 3A, para los cuales los resultados obtenidos con la aplicación de sus correspondientes esquemas de ponderación predefinidos se presentan en la siguiente Figura 20.



**Figura 20.** Esquemas de ponderación pre-definidos 3 (generación energética a través de renovables) (a) y esquema pre-definido 3A (generación energética a través de renovables + consideraciones económicas) (b).

Comparando los esquemas predefinidos 3 y 3A, se puede concluir que los resultados de un escenario se vuelven invariables, con los valores más bajos de costo y beneficio, que corresponde a la aplicación de la medida activa por separado.

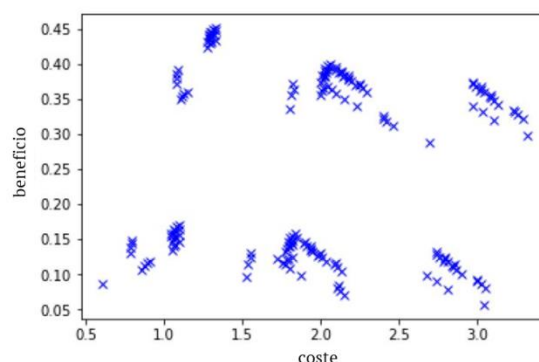
El conjunto de puntos se divide en dos grupos principales (con los costes de beneficio más altos o más bajos): en este conjunto de gráficos correspondientes a los esquemas predefinidos 3 y 3A, el desplazamiento hacia la parte superior de los escenarios correspondientes al aislamiento térmico por el exterior y el aislamiento de cubierta en combinación con medidas activas y renovables se hace más visible y la diferencia entre los

valores de coste y beneficio de los escenarios es menos evidente. La razón de esto puede estar en la configuración de los esquemas de priorización: en ambos casos se han aplicado pesos más altos a un número reducido de DPis a ENV06 (periodo de amortización de energía) y ENE06 (energía fósil neta consumida) y ENE09 (porcentaje de energía cubierta por fuentes renovables), estos últimos relacionados entre sí.

Los conjuntos de escenarios son fácilmente identificables en ambos casos. Además, los conjuntos de escenarios son más claramente identificables como en los casos anteriores, y tienen valores de coste y beneficio más similares entre sí. Además, los valores de coste son muy similares para cada conjunto de escenarios en los que se han aplicado MAES similares.

Al comparar estos dos escenarios con el anterior, se puede demostrar que los conjuntos de escenarios son más claramente identificables que en los conjuntos de gráficos anteriores: esto implica que las pequeñas diferencias en los tipos de MAES no se pueden apreciar completamente, especialmente en términos de coste. En la parte superior se obtienen valores de beneficios más altos en este esquema para los escenarios donde se han aplicado las energías renovables, lo que parece lógico debido a la definición del esquema: prioridad a la generación de energía a través de las energías renovables.

Finalmente, los resultados obtenidos mediante la aplicación del esquema de ponderación predefinido 6A se muestran en la Figura 21, donde se puede observar que: hay dos grupos principales de escenarios. Como en casos anteriores, hay una gran diferencia entre los escenarios donde se considera la implementación de energías renovables (valores máximos de beneficio) y donde no (valores más bajos).



**Figura 21.** Esquema de ponderación 6A (aspectos ambientales + consideraciones económicas).

Para este esquema, los grupos de escenarios son fácilmente identificables: como sucede anteriormente, los diferentes conjuntos de escenarios se pueden apreciar fácilmente. Cabe

señalar que especialmente aquellos con un valor de coste inferior a 1.5 permanecen bastante constantes en los valores de coste, formando líneas verticales.

Estos escenarios corresponden a escenarios donde se han aplicado las siguientes combinaciones: A, P + A, P + A + R, P int + P cubierta + A y P int + P cubierta + A + R.

### 5.5.2 Observación del frente de Pareto

A pesar de que se pueden extraer algunas conclusiones del análisis visual de estos gráficos, se ha realizado un análisis más detallado a los escenarios que pertenecen al frente de Pareto, para verificar los que se muestran al usuario al final del proceso.

Así, se ha realizado un análisis de los frentes de Pareto obtenidos en base a valores numéricos donde cada par de esquemas se compara entre sí para detectar las principales diferencias.

A modo de resumen de los resultados obtenidos a través del análisis realizado [105], se presenta la siguiente tabla, donde se muestran los diferentes esquemas considerados, así como el número de escenarios en sus respectivos frentes de Pareto, los objetivos y umbrales límite que han alcanzado, junto con sus valores máximos y mínimos de coste y beneficio.

**Tabla 21.** Resumen del frente de Pareto y de valores de coste y beneficio.

Esquema	Número de escenarios	Mínimo valor beneficio	Máximo valor beneficio	Mínimo valor coste	Máximo valor coste
1	11	0,047	0,486	0,774	1,597
1A	20	0,047	0,486	0,549	2,545
2	9	0,043	0,460	0,788	1,558
2A	19	0,043	0,460	0,586	2,035
3	20	0,057	0,451	0,314	1,669
3A	24	0,057	0,451	0,265	2,259
4	20	0,057	0,533	0,314	1,669
4A	24	0,057	0,533	0,265	2,259
6A	20	0,057	0,451	0,604	3,323

De la Tabla 21 se puede deducir que los pares de esquemas de ponderación de priorización 1 y su esquema económico complementario (1A) experimentan una variación esperada en los valores de coste, lo que a veces puede ser muy influyente en el número de escenarios en el frente de Pareto. En este último aspecto, también es notable que aparece un

mayor número de escenarios en el frente de Pareto para los esquemas de priorización que integran aspectos económicos (1A, 2A, 3A y 4A).

Al comparar los valores mínimos y máximos de beneficio entre sí, se puede observar que la desviación entre estos no es grande. Sin embargo, cuando se hace el mismo ejercicio con valores de coste mínimo y valores de coste máximo, se puede ver que existen grandes diferencias.

Estos pueden provenir de los DPI considerados en cada grupo de coste y beneficio: mientras que en la lista de costes (ENV01, ENV04, ECO02.2, ECO03 y ECO05) los DPI son muy diferentes entre sí, en los beneficios (ENE01, ENE02, ENE06, ENE09, ENE13 y COM01) los DPI evolucionan en la misma dirección.

Esto implica que se experimentarán mayores cambios en los costes cada vez que un parámetro cambie en la definición de los escenarios o en los resultados de DPI, mientras que en el lado de los beneficios, seguirá siendo bastante invariable.

## 5.6 Conclusiones

La herramienta presentada en este documento ofrece un sistema de evaluación a los agentes involucrados en el proceso de rehabilitación energética con el fin de apoyarles durante la toma de decisiones para diseñar proyectos de rehabilitación energética a escala de distrito. Proporciona un método integral para tomar decisiones más informadas a través de la evaluación del comportamiento de la línea base y los escenarios de rehabilitación candidatos con respecto a un conjunto de criterios en campos relevantes como energía, confort o aspectos económicos. Esta herramienta automatiza la generación de estos escenarios mediante la combinación de medidas de ahorro de energía, que se seleccionan en función de las barreras y prioridades establecidas por el usuario.

Un elemento central de esta plataforma es la metodología de evaluación y la herramienta de evaluación que se ha desarrollado y validado tal como se presenta en este artículo. Esta metodología integra métodos de análisis de decisiones multi-criterio para apoyar la construcción de un juicio integral del comportamiento del distrito bajo diferentes alternativas de rehabilitación.

Uno de los principales desafíos es la integración de la información subjetiva que proviene de los agentes del proceso con respecto a sus prioridades y transformarla en información cuantificable que pueda respaldar el despliegue de la evaluación adecuada.

Este artículo presenta un enfoque para resolver este problema mediante la integración de un método de comparación por pares para generar los pesos que permiten construir las funciones de coste y beneficio y así evaluar y optimizar los escenarios candidatos de rehabilitación. Este método ha llevado al despliegue de un conjunto de esquemas de ponderación predefinidos que capturan varios enfoques para la rehabilitación energética a escala de distrito, como priorizar la integración de las energías renovables o los aspectos ambientales. El método para construir los esquemas de ponderación predefinidos ha seguido los mismos principios que los que seguirán los agentes del proceso al establecer sus propias prioridades para garantizar que la evaluación esté en línea con sus expectativas.

### **5.6.1 Validación del método de evaluación**

Las validaciones realizadas han demostrado la validez del método de evaluación con los resultados de una serie de indicadores en escenarios en los que se ha aplicado un conjunto determinado de MAES.

Como entrada para la metodología de evaluación se emplean los criterios de priorización. En este artículo se han evaluado una serie de esquemas de ponderación predefinidos que han sido desarrollados para la metodología de evaluación. Como conclusión de este análisis, se ha extraído lo siguiente:

- Las funciones de coste y beneficio obtenidas después de evaluar los escenarios candidatos con los esquemas de ponderación predefinidos son razonables.
- Si bien algunos esquemas predefinidos presentaron gráficos en los que la distribución de puntos estaba más extendida, debe destacarse que en esquemas como 3 o 3A (aquellos esquemas relacionados con la generación de energía a través de energías renovables) los puntos correspondientes a conjuntos de escenarios donde se implementaba el mismo tipo de MAES fue más concentrada, lo que indica que estos esquemas dejaron poco espacio para apreciar las diferencias entre el mismo tipo de medidas.
- También se aprecia la gran diferencia entre los esquemas donde se favorecían las energías renovables (como los esquemas 3 o 3A) y el resto. En estos primeros esquemas se puede observar que los escenarios donde se han aplicado las energías renovables tienen mayores beneficios. Esta fue la intención principal de la configuración del esquema. Sin embargo, puede ser aconsejable informar al usuario de estos hechos al aplicar los esquemas predefinidos.



- Para los esquemas de priorización impulsados económicamente (1A o 3A), aparece un mayor número de escenarios en el frente de Pareto. Se puede deducir que el uso de estos esquemas hace posible discriminar mejor los escenarios con medidas similares al intensificar sus principales diferencias.

El análisis de los valores numéricos del frente de Pareto no proporcionó información muy relevante para el análisis, ya que las distribuciones de puntos y las observaciones relacionadas ya se habían llevado a cabo. Sin embargo, debe destacarse que, independientemente del esquema, los valores de beneficios extremos no varían significativamente, mientras que se pueden ver diferencias importantes en los valores de costes.

Estas validaciones han servido para que la herramienta aborde casos más complejos, evaluando y optimizando distritos con varios edificios que cubren la evaluación completa de los efectos entre edificios y cómo la optimización a escala de distrito puede derivar en beneficios más amplios que al abordar edificios individualmente. En estos casos, la escala del problema de optimización aumenta drásticamente y requiere suficiente potencia para calcular los modelos de simulación en un tiempo razonable. Esto se aborda a través de técnicas como computación paralela para hacer frente a la cantidad de modelos requeridos.

## **5.6.2 Limitaciones y consideraciones**

Como se puede apreciar dentro de la descripción de la metodología y su validación, la implementación de este enfoque depende en gran medida de la calidad de la información de entrada proporcionada para realizar tanto la validación como la evaluación de los escenarios candidatos de rehabilitación para apoyar eficazmente la toma de decisiones. La calidad de los datos de entrada se valida a través de un conjunto de procesos que garantizan la integridad y los requisitos mínimos de calidad para generar los modelos de simulación que permita lanzar las herramientas que integran el conjunto de herramientas de simulación. Sin embargo, existe la necesidad de una validación intensiva de la precisión de estos datos por parte del usuario antes de insertarlos en la herramienta para garantizar que el distrito a evaluar esté representado adecuadamente dentro de los modelos que capturan la situación antes de implementar el proyecto de rehabilitación.

Además de la precisión de los datos, como se puede concluir de la implementación de los diversos esquemas de priorización, la forma en que se formulan y clasifican los escenarios candidatos depende de una selección adecuada de las prioridades a alcanzar cuando se describe

el problema a abordar por la plataforma. La herramienta permite a los usuarios seleccionar entre una gama de esquemas de ponderación de prioridades o la definición de un esquema propio mediante la implementación de un método de comparación por pares sobre los indicadores seleccionados para la evaluación. La selección de la importancia dada a cada indicador sobre los demás, que tiene como objetivo transformar la información subjetiva en un problema matemático objetivo para permitir identificar los escenarios óptimos de rehabilitación, es, por lo tanto, un elemento clave para garantizar que los mejores escenarios sean aquellos que responden a las condiciones de contorno que han establecido los agentes involucrados en el proceso de rehabilitación.

### **5.6.3 Líneas de investigación futuras**

El trabajo futuro podría considerar la integración de más dominios dentro del método de evaluación para cubrir otros campos relevantes además de la evaluación de medidas de eficiencia energética. El método y la herramienta de evaluación propuestos han demostrado ser lo suficientemente flexibles y ampliables para garantizar una integración adecuada de nuevos desarrollos.

En conclusión, este método de evaluación y su integración dentro de la herramienta para ofrecer servicios para el diseño de proyectos energéticamente eficientes puede proporcionar importantes beneficios a los agentes del proceso, como permitir una toma de decisiones más informada e integral, la consideración de sus prioridades de manera cuantificable y la automatización del proceso de evaluación que reduce el tiempo y las incertidumbres y una mejor integración de los agentes.



## **ARTÍCULO 3:**

Integración de criterios de priorización en el diseño de proyectos de rehabilitación energética de barrios: un caso de estudio

## **6 Integración de criterios de priorización en el diseño de proyectos de rehabilitación energética a escala de distrito: un caso de estudio**

### **6.1 Introducción**

Los edificios representan aproximadamente el 40% del consumo de energía y el 36% de las emisiones de GEI en el contexto de la UE [106]. Al analizar el stock de edificios existentes, alrededor del 30% tiene más de 50 años [107] y casi el 75% es energéticamente ineficiente [108] [109]. Las implicaciones de esta ineficiencia energética no solo derivan en un coste energético y ambiental, sino que también provocan otros impactos como problemas de salud debido a los bajos niveles de confort dentro de estos edificios [110]. Por lo tanto es imperativo centrar los esfuerzos en mejorar el entorno construido, cuyas tasas de renovación actuales son excesivamente bajas (aproximadamente el 1.2%). Para alcanzar estos objetivos, esta tasa debería aumentar al 3% [111].

Por otro lado, el mercado de rehabilitación está bastante fragmentado con múltiples actores involucrados con intereses diferentes y a menudo contrapuestos. Esto se refleja en los intercambios de comunicación e información entre ellos. Esta fuerte barrera se añade a otras como la falta de conocimiento de algunas tecnologías por parte de los profesionales de la construcción, la ambición variable de los requisitos de comportamiento existentes dentro de la regulación, la falta de conciencia o la incertidumbre sobre los ahorros esperados que hacen que los inversores se muestren reacios a cubrir la inversión inicial necesaria para llevar a cabo el proyecto de rehabilitación energética.

Por lo tanto, se debe mejorar todo el proceso de rehabilitación para explotar en mayor medida el potencial de las herramientas existentes y la implementación de procesos integrados, al tiempo que se reducen las incertidumbres y se mitigan los riesgos [112]. Dado el nivel del desafío, el modelo tradicional no es una opción. Al abordar los retos anteriores de manera

correcta, es posible incrementar la viabilidad económica de la rehabilitación energética y, a su vez, fomentar la generación de nuevos servicios y modelos de negocio.

Reconociendo los desafíos anteriores, existe la necesidad de soluciones que faciliten la colaboración, el intercambio de información, el análisis y la evaluación para apalancar la rehabilitación energética con procesos que mejoren la cadena de valor. En este contexto, el proyecto OptEEmAL ha desarrollado una herramienta que tiene como objetivo mejorar la fase de diseño para generar proyectos de rehabilitación con la eficiencia energética como eje principal. Esta herramienta ha sido diseñada para facilitar el proceso, reducir el tiempo y las incertidumbres y, por lo tanto, reducir los costes y aumentar la confianza en el proceso de rehabilitación [113].

OptEEmAL como herramienta para llevar a cabo estos servicios, se basa en la integración de 5 pilares principales, y está concebida para proporcionar una integración adecuada de estos cinco conceptos que permiten proporcionar a los usuarios esta herramienta integral destinada a reducir el tiempo y los costes en la fase de diseño y mejorar todo el proceso en términos de gestión, flujos de información y calidad del diseño. Estos pilares se pueden resumir como:

- Integración de un enfoque de Modelado de Información de Edificios (BIM) [114] para mejorar el enfoque de colaboración entre las partes interesadas y mejorar los flujos de información dentro del proceso de diseño.
- Integración de un enfoque del diseño de la rehabilitación basado en la Gestión Integral del Proyecto [115] (IPD), para facilitar los flujos de comunicación, el intercambio de conocimientos y el consenso entre las partes involucradas.
- Integración de un catálogo de medidas de ahorro de energía (MAES o *Energy Conservation Measures*, ECM) considerando la escala de implementación y proporcionando todos los datos necesarios para la evaluación de las alternativas de diseño.
- Integración de un enfoque de Análisis de Decisión Multi-Criterio (MCDA) [116] para la toma de decisiones integrando el interés de los agentes del proceso y haciendo uso de indicadores bien establecidos a diferentes escalas.
- Integración de un modelo de datos semántico y procesos de mapeo de datos para garantizar la interoperabilidad entre los componentes de la plataforma y la consistencia de las comunicaciones.

Por lo tanto, a través de la integración de estos elementos, la herramienta OptEEmAL ofrece un diseño optimizado (matemáticamente hablando) e integrado (es decir, con un enfoque holístico) que considera diferentes dimensiones (energía, medio ambiente, economía, comodidad, etc.). El cumplimiento de la normativa y la inclusión de las expectativas y restricciones existentes se tienen en cuenta a través de criterios de priorización y objetivos y umbrales límite definidos por el usuario. Los intereses de las diferentes partes involucradas están representados en OptEEmAL, ya que la gestión integrada del proyecto se aplica en todas las etapas de la herramienta a través de las interfaces gráficas de usuario cuyo diseño se basa en proporcionar a estos agentes interesadas las conexiones adecuadas con la herramienta en dichos pasos. Por lo tanto, las partes involucradas son las que establecen los objetivos, umbrales límite, barreras y criterios de priorización necesarios que se utilizan para definir el problema dentro de la herramienta. Esto es de suma importancia ya que la aplicación de MAES, la generación de escenarios y el proceso de optimización se ven afectados por estas opciones.

Este artículo presenta las actividades llevadas a cabo para diseñar, desarrollar e implementar esta herramienta y se centra en la integración de los criterios de priorización para evaluar los escenarios candidatos de rehabilitación, exponiendo su implementación dentro de un caso de estudio que permite identificar los principales impactos de la selección de diferentes prioridades para diseñar proyectos de rehabilitación energética.

## 6.2 La herramienta OptEEmAL

Teniendo en cuenta los problemas encontrados en el diseño de proyectos de rehabilitación, OptEEmAL ha desarrollado una herramienta que captura el conocimiento experto para automatizar algunos de los pasos del proceso para diseñar soluciones de rehabilitación energética, lo que conduce a una reducción de tiempo y costes [117].

Como se refleja en la Figura 22, la herramienta OptEEmAL proporciona cuatro procesos en una solución integrada en torno a un marco de interoperabilidad para garantizar el uso y la explotación adecuada de los datos. Estos procesos son:

- **Inserción de datos (1).** La herramienta ha sido diseñada para explotar diferentes fuentes de datos con el fin de generar los modelos que permitan apoyar a los agentes durante la toma de decisiones y el proceso de diseño. Por lo tanto, el primer paso consiste en la inserción de datos por parte de los usuarios desde varias fuentes para alimentar y crear la primera instancia del modelo de datos. Como datos de entrada, se solicita a los usuarios que carguen Modelos de Información (BIM) de los edificios

sujetos a modificaciones en formato IFC [118] y un Modelo de Información del Distrito que contenga esos edificios y los alrededores en formato CityGML [119] que represente la geometría y las propiedades de los materiales, zonas térmicas y horarios de uso en la herramienta. Para elaborar estos modelos correctamente, se han generado unas guías que contienen las instrucciones básicas para evitar errores en el modelado y para asegurar el modelado de la información necesaria para el funcionamiento de OptEEmAL [120] [121]. Teniendo en cuenta la referencia geográfica insertada a través del modelo CityGML, la herramienta recaba datos de fuentes de datos existentes como Eurostat o bases de datos de datos climáticas para completar la información con los precios de la energía y las condiciones climáticas de la ubicación del distrito. Este paso también cubre dos funcionalidades centrales de la herramienta, que son el emparejamiento de los archivos IFC y CityGML, y la inserción de información sobre los sistemas de energía del edificio y del distrito. Toda esta información se mapea en el Modelo de Datos del Distrito (DDM), que basado en tecnologías OWL [122], permite modelar todos los datos requeridos para las funcionalidades cubiertas por la herramienta. Para mapear esta información, primero se implementa un proceso clave de verificación de calidad de datos que cubre tanto la validación de los archivos como la de la información proporcionada por los usuarios y las fuentes de datos externas y asegura su calidad para los propósitos de OptEEmAL. Esta comprobación de datos evalúa los errores de geometría o la integridad de datos, entre otros. Se ha diseñado e implementado un conjunto de herramientas [123] para este propósito.

- **Integración de datos y cálculo de línea de base (2).** Una vez que se cargan todos los datos y se verifica su corrección, la primera instancia del DDM se rellena y se utiliza para generar un conjunto de modelos de simulación para evaluar las condiciones actuales del distrito (el llamado escenario de referencia o línea base). Este escenario de referencia se caracteriza por un conjunto de Indicadores de Comportamiento del Distrito (*District Performance Indicators*, DPI) que establecen el rendimiento del grupo de edificios en los ámbitos de energía, medio ambiente, economía, confort, aspectos sociales y urbanos. El cálculo de estos DPI se realiza a través de un conjunto de herramientas de simulación que se han integrado en OptEEmAL para calcular los indicadores y luego procesarlos y agregarlos para calcular los DPI. En total, cuatro herramientas permiten estos cálculos, que son Energy Plus [124] (para calcular los indicadores relacionados con la demanda de energía), una herramienta desarrollada específicamente para OptEEmAL llamada herramienta HVAC [125] (para calcular los



indicadores relacionados con el consumo de energía), la herramienta NEST [126] (para calcular los indicadores ambientales) y una herramienta de cálculo de indicadores económicos y sociales [127] desarrollada para la herramienta OptEEmAL. Todas estas herramientas juntas forman el Conjunto de Herramientas de Simulación de OptEEmAL, que utiliza como datos de entrada la información almacenada dentro del DDM y proporciona como resultado los DPI calculados y procesados posteriormente.

- **Proceso de generación y optimización de escenarios (3).** Teniendo en cuenta los resultados de la línea base, el tercer paso supone el proceso central de la herramienta, que proporciona un conjunto de soluciones al problema formulado por el usuario, entendiendo el problema como un distrito que se debe rehabilitar para mejorar su eficiencia energética. En este paso, se ejecuta un conjunto de modelos y herramientas para formular un problema matemático que permite optimizar los DPI de acuerdo con un conjunto de reglas y para un conjunto de escenarios candidatos. Estos escenarios se generan como combinaciones de medidas de conservación de energía (MAES) que se dividen en tecnologías pasivas, activas, renovables y de control. Estas soluciones están catalogadas dentro de una base de datos completamente interoperable con el DDM y que contiene información geométrica, energética, económica, técnica y de mantenimiento de un conjunto de 135 medidas que pueden implementarse en los elementos de los edificios que reemplazan los activos existentes (por ejemplo, reemplazar las calderas existentes) o que se agrega a los originales (por ejemplo, un aislamiento externo a las paredes). Un componente llamado optimizador es el responsable de generar poblaciones de escenarios candidatos de rehabilitación como combinaciones de MAES y siguiendo ciertas reglas de incompatibilidad entre ellos, y también solo considerando aquellas medidas que han sido verificadas y aprobadas por los usuarios de la herramienta, para evitar proponer soluciones no compatibles con las expectativas de los usuarios. Estos escenarios, en forma de vectores de escenarios, se mapean para generar tantas instancias del DDM como vectores de escenarios existen en cada iteración, y luego, siguiendo los mismos pasos que para calcular la línea base, se transforman en modelos de simulación para calcular y post-procesar los mismos DPI en las categorías mencionadas anteriormente. Este proceso se repite hasta que se cumplan los criterios de parada. La optimización tiene como objetivo encontrar el mejor conjunto de escenarios entre las poblaciones propuestas evaluadas en una función de coste-beneficio que integra y agrega los DPI siguiendo un esquema de ponderación que representa las prioridades de los usuarios de la herramienta, como se

explica en la siguiente subsección 6.2.1. Los usuarios también establecen los criterios de parada en forma de objetivos de umbrales límite para ciertos DPI (por ejemplo, inversión máxima, ahorro de energía deseado o emisiones de CO<sub>2</sub> evitadas esperadas).

- **Exportación de resultados (4).** Finalmente, a los usuarios se les presenta un conjunto de mejores escenarios de rehabilitación en un frente de Pareto [128], lo que les permite seleccionar el escenario o escenarios deseados y exportar los resultados producidos por la herramienta en forma de informes para la línea base y el escenario seleccionado), lista y descripción detallada de las MAES considerados en el escenario y los modelos de estas MAES que luego pueden ser visualizados y utilizados por otras herramientas externas.

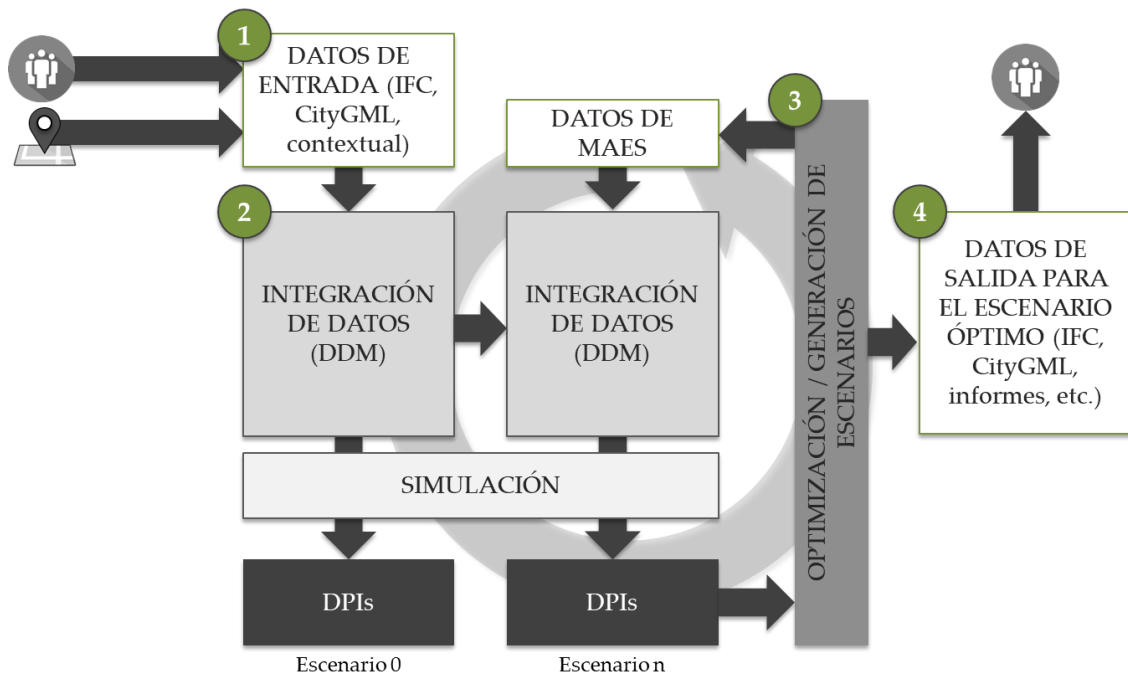


Figura 22. Esquema de la herramienta OptEEmAL.

Todos estos cuatro procesos juntos permiten tomar decisiones más informadas y reducir el tiempo y los costes del proceso de diseño, lo que también tiene un impacto positivo en las etapas posteriores del proceso a través de elementos como el uso de BIM.

### 6.2.1 Interacción de los agentes e importancia de los criterios de priorización

El papel de los usuarios dentro de la herramienta es un elemento esencial, ya que uno de sus principales objetivos es superar la barrera existente de la fragmentación existente dentro de los procesos actuales de rehabilitación. Basado en el enfoque IPD [129], OptEEmAL fomenta

la interacción y una colaboración más eficiente entre las partes involucradas, que están representadas en la herramienta como tres roles principales: propietario del proyecto, proyectista principal y constructor principal del proyecto, lo que permite el registro de varios usuarios para el roles de proyectista principal y constructor principal. Estos tres roles tienen permisos para cubrir pasos específicos del proceso de diseño y acceso a proporcionar información como la definición de condiciones límite, objetivos, barreras y, especialmente, los criterios de priorización que condicionan la optimización de los escenarios de rehabilitación.

Por lo tanto, el problema se formula para encontrar el conjunto de escenarios que cumplen una serie de requisitos y que maximizan o minimizan ciertos indicadores de acuerdo con su importancia relativa para las partes interesadas involucradas en cada caso específico. De acuerdo con los principios de IPD, las decisiones deben tomarse siguiendo un consenso [130]. La herramienta solo permite al usuario registrado como propietario insertar los criterios de priorización. Sin embargo, esta información se comparte con los usuarios restantes registrados como proyectista principal y constructor principal, que deben aprobar la relevancia de los criterios insertados por el propietario del proyecto.

## **6.2.2 Transformación de información subjetiva en un problema matemático**

Como se explica anteriormente, la herramienta OptEEmAL ha sido diseñada y desarrollada para transformar los datos de entrada en un problema matemático para dar soporte a la toma de decisiones y optimizar el diseño de proyectos de rehabilitación energética. La importancia de los criterios que forman el esquema de evaluación de la herramienta es esencial para asegurar una generación y evaluación apropiadas de alternativas de escenarios candidatos de rehabilitación, y por lo tanto debe formularse correctamente. Como se explica en [131], existen varios mecanismos para transformar la información subjetiva en esquemas de ponderación que representan la importancia de un conjunto de indicadores para un problema dado. En este caso, la comparación por pares de los indicadores es la seleccionada, que es un método relativamente imparcial que aplica un valor de importancia (del 1 al 9) a los indicadores por pares, comparando, por lo tanto, un indicador sobre el otro.

Por lo tanto, la intensidad de la importancia está representada por una escala de números, donde 1 muestra igual importancia, 3: importancia moderada, 5: importancia fuerte, 7: importancia muy fuerte o demostrada, y 9: importancia extrema [132].

## 6.3 Metodología

Un problema de optimización es el que tiene como objetivo encontrar una solución que maximice (o minimice) una función. En el caso de OptEEmAL, el problema de optimización se ha definido como encontrar el mejor conjunto de escenarios que maximicen los beneficios y minimicen los costes representados como una agregación de indicadores. Por lo tanto, combina una optimización de la función de dos objetivos donde el beneficio y los costes se basan en una agregación ponderada de un conjunto de indicadores calculados a través de las herramientas de simulación que forman el paquete de herramientas de simulación.

El esquema de evaluación de la herramienta se ha creado a través de 42 indicadores que caracterizan el comportamiento del distrito en los campos relevantes de energía, confort, medio ambiente, económico, social, urbano y global. De este grupo de indicadores que forman el esquema de evaluación de la herramienta, 18 han sido seleccionados para formular el problema de optimización, pertenecientes a los grupos de energía, confort y aspectos ambientales y económicos. Tras su selección, se han categorizado en beneficios y costes, donde los beneficios son todos aquellos indicadores que resultan en una mejora del rendimiento del distrito (por ejemplo, ahorro de energía o mejora del confort), mientras que aquellos que forman la función de costes no solo están relacionados con aspectos económicos, sino que también cubre todos los campos que provocan un impacto negativo asociado al desempeño del distrito (por ejemplo, emisiones de CO<sub>2</sub>).

Teniendo en cuenta este enfoque, las funciones de coste y beneficio se han desarrollado como se explica en las subsecciones siguientes, siendo esta la base para la evaluación y optimización de escenarios candidatos de rehabilitación dentro de la herramienta.

### 6.3.1 Construcción de las funciones coste-beneficio

Como se muestra en el apartado anterior, una función de coste-beneficio es la que conduce la optimización OptEEmAL. Estas funciones se formulan de la siguiente manera:

$$B(x) = \sum_{i=1}^n w_{ENEi} \cdot I_{ENEi}(x) + \sum_{i=1}^n w_{COMi} \cdot I_{COMi}(x) \quad (1)$$

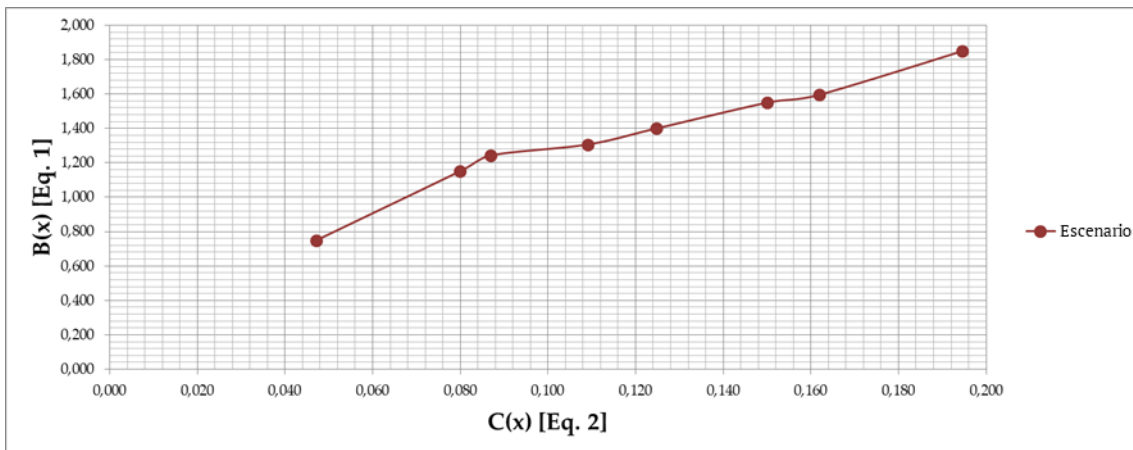
$$C(x) = \sum_{i=1}^n w_{ECOi} \cdot I_{ECOi}(x) + \sum_{i=1}^n w_{ENVi} \cdot I_{ENVi}(x) \quad (2)$$

Donde:

$w_i$  es el peso dado al indicador ENE<sub>i</sub> bajo el esquema de priorización

$I_i(x)$  es el valor normalizado del indicador ENE<sub>i</sub> para el escenario x

Estas funciones representan, por lo tanto, el comportamiento del distrito para cada escenario candidato (x) y son aquellas que deben optimizarse para encontrar el conjunto de los mejores escenarios de acuerdo con los criterios de priorización que se han insertado como pesos para los indicadores.



**Figura 23.** Ejemplo de representación de las funciones coste beneficio para los escenarios óptimos.

Por lo tanto, la suma ponderada de los indicadores normalizados para los campos mencionados anteriormente permite calcular el coste y el beneficio para cada escenario y representarlos en un gráfico donde el frente de Pareto muestra aquellos que se consideran óptimos según los criterios seleccionados.

La siguiente tabla muestra los tres grupos de indicadores que forman las funciones de coste y beneficio [133]:

**Tabla 22.** Lista de indicadores (DPIs) que conforman la función coste-beneficio.

Grupo y nombre	Unidades	Descripción
<b>Grupo 1 – coste</b>		
ENV01	Potencial de calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> /año
		Estimación de las emisiones equivalentes totales de CO <sub>2</sub> (en kg eq. de CO <sub>2</sub> ) debido al consumo de energía y al uso de materiales de construcción.
ENV04	Consumo de energía primaria	MJ/m <sup>2</sup> /año
		El consumo de energía del ciclo de vida generalmente se expresa en energía primaria en lugar de unidades de energía entregada (o energía final).

Grupo y nombre		Unidades	Descripción
ENV06	Periodo de amortización de la energía	años	Tiempo necesario para ahorrar la cantidad de energía primaria "invertida" en el ciclo de vida de los materiales de rehabilitación (producción, transporte, fin de vida útil, etc.) con la reducción del consumo de energía debido al proceso de rehabilitación.
ECO02	Inversión	€/m <sup>2</sup>	Total de activos monetarios relacionados con cada escenario de renovación.
ECO03	Coste de ciclo de vida	€	Cantidad de unidades monetarias requeridas para la instalación inicial, el costo operativo de energía y el mantenimiento de un escenario de renovación particular.
ECO05	Periodo de amortización	años	Tiempo necesario para cubrir los costos de inversión. Se puede calcular como el número de años entre la inversión inicial y el momento en que los ahorros acumulativos compensan la inversión.
<b>Grupo 2 – beneficios 1</b>			
ENE01	Demanda energética	kWh/m <sup>2</sup> .año	Energía total requerida para mantener condiciones predefinidas en todos los espacios acondicionados del edificio.
ENE02	Consumo de energía final	kWh/m <sup>2</sup> .año	Adición de todos los consumos de energía individuales de los sistemas instalados en los espacios del distrito teniendo en cuenta sus eficiencias y las pérdidas de energía asociadas.
ENE06	Consumo de energía fósil	kWh/m <sup>2</sup> .año	Energía consumida por el distrito que proviene directamente de los combustibles fósiles (materiales que contienen una alta concentración de carbono como el carbón, el petróleo y el gas natural).
ENE09	Porcentaje de energía final cubierta por renovables	%	Cantidad de la energía final total consumida en el distrito que está cubierta por fuentes de energía renovables como la energía solar, eólica y geotérmica.
ENE13	Uso de energía de redes de calor	kWh/m <sup>2</sup> .año	Cantidad de consumo total de energía del distrito que se origina de la calefacción de distrito.
COM01	Confort térmico local	Nivel	El confort térmico local se calcula en función del voto medio previsto (PMV) y el porcentaje previsto de insatisfechos (PPD). Por lo tanto, el nivel de confort térmico se estima a partir de la temperatura del aire, la velocidad del aire, la tasa metabólica, la ropa y la humedad.

Grupo y nombre	Unidades	Descripción
<b>Grupo 2 – beneficios 2 (subgrupo de ENE09)</b>		
ENE14	Uso de energía de biomasa kWh/m <sup>2</sup> .año	Cantidad de consumo total de energía del distrito que se genera con biomasa.
ENE15	Uso de energía de fotovoltaica kWh/m <sup>2</sup> .año	Cantidad del uso total de energía del distrito, donde la energía se obtiene directamente de paneles solares fotovoltaicos, instalados en los edificios o en el distrito.
ENE16	Uso de energía de solar térmica kWh/m <sup>2</sup> .año	Cantidad del uso total de energía del distrito, cuya energía se obtiene directamente de paneles solares térmicos, instalados en los edificios o en el distrito.
ENE17	Uso de energía de hidráulica kWh/m <sup>2</sup> .año	Cantidad del uso total de energía del distrito, cuya energía se origina en generadores hidráulicos.
ENE18	Uso de energía de mini-eólica kWh/m <sup>2</sup> .año	Cantidad del uso total de energía del distrito, cuya energía se origina en generadores de turbinas eólicas.
ENE19	Uso de energía de geotermia kWh/m <sup>2</sup> .año	Cantidad del uso total de energía del distrito, cuya energía se origina en la energía geotérmica.

### 6.3.2 Generación de esquemas de ponderación

Utilizando el método de comparación por pares de indicadores tal y como se explica anteriormente, los esquemas de ponderación se generan transformando la importancia relativa de los criterios dados por los usuarios en valores de ponderaciones. Esto se realiza mediante el cálculo de los vectores propios de las matrices generadas formadas con los valores que comparan la importancia de los pares de indicadores, que son recíprocos [134].

La herramienta OptEEmAL ha implementado dos métodos para permitir a los usuarios seleccionar las prioridades para guiar la generación y evaluación de escenarios. Como primer método, pueden comparar manualmente cada par de indicadores a través de una interfaz gráfica de usuario que muestra un conjunto de controles deslizantes destinados a seleccionar la importancia. Después de la comparación de los indicadores, los resultados del vector propio se muestran en forma de porcentajes de importancia asociados a cada criterio.

El segundo método proporciona un conjunto de esquemas de ponderación precargados que se han formulado y cargado externamente en la plataforma siguiendo el mismo método de comparación por pares pero en este caso llevado a cabo por un panel de expertos.

### 6.3.3 Configuración de esquemas de ponderación pre-definidos

Siguiendo los principios descritos anteriormente, la herramienta ofrece dos métodos para establecer los pesos de los criterios de priorización. El primero ofrece a los interesados la posibilidad de llevar a cabo un proceso de comparación por pares para los grupos de indicadores definidos en la Tabla 22, mientras que el segundo ofrece esquemas de ponderación predefinidos que incluyen pesos pre-calculados como se indica anteriormente [135]. Dentro de la segunda opción, se ofrecen un total de 7 esquemas predefinidos, donde cada uno se enfoca en una estrategia para dirigir el proceso de diseño del proyecto de rehabilitación:

- **Esquema 1: Prioridad para lograr un distrito de energía casi nula.** Da mayor importancia a los indicadores que reflejan una demanda de energía muy baja, al tiempo que cubre la energía requerida con una contribución significativa de fuentes de energía renovables.
- **Esquema 2: Prioridad para lograr un distrito neutro en carbono.** El énfasis está en los aspectos que reflejan la neutralidad de carbono del distrito, dando mayor importancia a la reducción de CO<sub>2</sub> y al aumento de la contribución de energía renovable.
- **Esquema 3: Prioridad a la generación de energía a través de energías renovables.** Da mayor importancia a la generación de energía a través de renovables, con igual importancia para todas las fuentes, mientras que la reducción de la demanda de energía no es tan relevante como en el esquema 1.
- **Esquema 4: Prioridad a la generación de energía a través de energías renovables (solar térmica y solar fotovoltaica).** De manera similar al esquema anterior, le da mayor importancia a la generación de renovables pero, en este caso, a la producción a través de tecnologías solares, tanto térmicas como fotovoltaicas.
- **Esquema 5: Prioridad a la generación de energía a través de una red de calor.** La mayor relevancia se otorga a la generación de energía a través de una red de calor.
- **Esquema 6: Prioridad a los problemas ambientales.** La emisión de CO<sub>2</sub>, el coste del ciclo de vida y la generación de energía a través de fuentes renovables son los indicadores con mayor relevancia dentro de este esquema.
- **Esquema 7: Prioridad para reducir los costes de energía de operación.** La importancia principal se da a los indicadores que reflejan la reducción del consumo



final de energía, el consumo neto de energía fósil y el periodo de amortización de la energía.

La siguiente tabla muestra los pesos de los indicadores de cada grupo en los escenarios pre-configurados dentro de la herramienta OptEEmAL:

**Tabla 23.** Pesos establecidos para los esquemas pre-definidos.

	1	2	3	4	5	6	7	
<b>COSTE</b>	ENV01	15,92%	48,10%	7,14%	7,14%	7,14%	32,40%	5,24%
	ENV04	60,64%	32,22%	7,14%	7,14%	7,14%	18,60%	23,40%
	ENV06	5,86%	4,92%	64,29%	64,29%	64,29%	10,74%	55,64%
	ECO02	5,86%	4,92%	7,14%	7,14%	7,14%	2,93%	5,24%
	ECO03	5,86%	4,92%	7,14%	7,14%	7,14%	32,40%	5,24%
	ECO05	5,86%	4,92%	7,14%	7,14%	7,14%	2,93%	5,24%
		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
<b>BENEFICIO 1</b>	ENE01	19,79%	10,74%	4,55%	4,55%	3,76%	4,55%	14,51%
	ENE02	34,52%	18,60%	4,55%	4,55%	3,76%	4,55%	27,01%
	ENE06	19,79%	32,40%	40,91%	40,91%	24,52%	40,91%	27,01%
	ENE09	19,79%	32,40%	40,91%	40,91%	24,52%	40,91%	14,51%
	ENE13	3,05%	2,93%	4,55%	4,55%	39,68%	4,55%	14,51%
	COM01	3,05%	2,93%	4,55%	4,55%	3,76%	4,55%	2,43%
		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
<b>BENEFICIO 2</b>	ENE14	16,67%	16,67%	16,67%	4,55%	40,91%	16,67%	16,67%
	ENE15	16,67%	16,67%	16,67%	40,91%	4,55%	16,67%	16,67%
	ENE16	16,67%	16,67%	16,67%	40,91%	4,55%	16,67%	16,67%
	ENE17	16,67%	16,67%	16,67%	4,55%	4,55%	16,67%	16,67%
	ENE18	16,67%	16,67%	16,67%	4,55%	4,55%	16,67%	16,67%
	ENE19	16,67%	16,67%	16,67%	4,55%	40,91%	16,67%	16,67%
		100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Todos estos esquemas se implementan en la herramienta para permitir que el usuario seleccione uno de ellos para la evaluación y la optimización de los escenarios candidatos de rehabilitación.

## **6.4 Caso de estudio: barrio de Cuatro de Marzo (Valladolid)**

### **6.4.1 Introducción general**

El distrito Cuatro de Marzo es un barrio residencial ubicado en la ciudad de Valladolid. Los edificios del barrio fueron construidos entre 1955 y 1960 en una zona residencial compacta de viviendas con una calidad constructiva relativamente baja y que están sufriendo un envejecimiento progresivo. El barrio está demarcado entre el río Pisuerga y el Paseo Zorrilla. Este distrito ha sido rehabilitado bajo el proyecto R2CITIES [136], [137] y, por lo tanto, existen datos para las situaciones previa y posterior a la rehabilitación energética. Este caso se ha empleado dentro del proyecto OptEEmAL para fines de validación, con objeto de evaluar la precisión y el rendimiento de la herramienta así como para evaluar su usabilidad. En este artículo, el foco se encuentra en la validación del método a través del que se consideran las prioridades para generar, evaluar y optimizar adecuadamente los escenarios candidatos de rehabilitación. Así, se han llevado a cabo un conjunto de simulaciones utilizando los esquemas de ponderación predefinidos descritos anteriormente.

El distrito en estudio se encuentra en una situación de baja eficiencia energética así como un muy bajo nivel de condiciones de confort en algunas de las viviendas. Las viviendas tienen sistemas de calefacción individuales (generalmente calderas de gas natural) sin ninguna contribución de energías renovables y con altos valores de consumo de energía, lo que resulta en elevadas facturas para los propietarios. El proyecto de rehabilitación se llevó a cabo para mejorar estas condiciones, concentrándose en mejorar las condiciones de confort mientras se reduce el consumo de energía y se integran fuentes de energía renovables [138].

El objetivo de este estudio es el de evaluar el impacto de seleccionar diferentes estrategias de priorización y analizar cómo estas estrategias derivan en la propuesta de una combinación diferente de medidas de ahorro de energía para mejorar el distrito y sus edificios.

### **6.4.2 Edificios objeto del estudio**

El barrio está compuesto por 190 edificios con un total de 1947 viviendas que pertenecen a dos tipologías principales: torre y bloque. Para este caso, se han seleccionado 5 edificios, que representan 2 torres y 3 bloques, que incluyen un total de 150 viviendas y 302 residentes [139].

Los 5 edificios están dedicados exclusivamente a uso residencial. Los edificios seleccionados son los que se muestran en la Figura 24, que se encuentran en el límite norte del barrio.



**Figura 24.** Edificios seleccionados en el distrito de Cuatro de Marzo.

### **6.4.3 Elaboración de los datos de entrada**

Como se explica en la sección 6.2, el primer paso del proceso cubre la elaboración de los datos de entrada que requiere la herramienta. Estos datos incluyen los modelos BIM de todos los edificios que son parte del proyecto de rehabilitación, el modelo CityGML que representa estos edificios y los de los alrededores, y datos relacionados con los sistemas de energía existentes en las condiciones actuales del distrito.

Como se menciona en la metodología, el modelado apropiado de los datos es esencial para garantizar que la herramienta pueda llevar a cabo los procesos de integración y mapeo de datos. Por lo tanto, las guías BIM y CityGML presentadas con anterioridad se han utilizado en el modelado de los 4 modelos BIM que representan los 5 edificios (uno para cada bloque y uno para las dos torres) con el uso de Autodesk Revit™ [140], y el modelo CityGML que representa el distrito, que se ha modelado utilizando el complemento CityEditor [141] para SketchUp [142].

Los modelos BIM se exportan en IFC utilizando un exportador para Autodesk Revit™, que se ha desarrollado específicamente para la herramienta OptEEmAL con el fin de garantizar que la información sobre materiales y programaciones se exporte correctamente.

### **6.4.4 Configuración del problema: inserción de datos y uso de la herramienta**

Una vez que se han generado los datos de entrada tal y como se explica en la sección anterior, estos se introducen en la herramienta para iniciar el proceso de generación y

evaluación de escenarios. Para esto, el primer paso es la configuración del problema dentro de la herramienta a través de la carga de los modelos e insertando la información de línea base, a la vez que los usuarios definen las condiciones de contorno existentes, barreras, criterios de priorización, etc.

#### **6.4.4.1 Inserción y emparejamiento de modelos BIM y CityGML**

El primer paso dentro de la herramienta está dedicado a cargar los modelos IFC y CityGML y hacerlos coincidir a través de una interfaz que se ha creado para este fin. Así, después de cargar el archivo CityGML para el proyecto, éste se muestra dentro de una interfaz que muestra la planta del modelo sobre un mapa generado sobre Bing Maps® [143] junto con la lista de archivos IFC cargados.

Una vez que se cargan los archivos, se inicia un proceso de verificación de calidad e integridad de los mismos mediante el uso de herramientas internas que permiten evaluar que los archivos son completos y que no existen problemas de geometría.

El usuario puede entonces seleccionar los archivos IFC asociados a los edificios en la planta del modelo CityGML, y así se produce un proceso de emparejamiento de ambos tipos de modelos. A continuación se lanza un conjunto de procesos de enriquecimiento como, por ejemplo, para identificar las superficies principales del distrito que generan sombras en los edificios seleccionados para la rehabilitación a través de una herramienta desarrollada para este objetivo llamada DNS [144].

#### **6.4.4.2 Sistemas energéticos pre-existentes**

Una vez que los modelos han sido cargados y emparejados, el siguiente paso se encarga de la definición de los sistemas de energía para la situación de referencia (estado actual del distrito). Este proceso se ha implementado en la herramienta a través de un cuestionario dedicado que permite al usuario seleccionar los sistemas de generación y distribución, así como las unidades terminales que van asociados a un catálogo de sistemas que se parametriza con los valores insertados por el usuario.

Para el caso bajo evaluación, todas las viviendas están equipadas con calderas individuales sin condensación con una capacidad de 18kW alimentadas por gas natural. Su eficiencia es de 0.722 y se desconoce el tiempo de inicio y parada. Para la selección de sistemas de distribución, los usuarios seleccionan cada una de las zonas térmicas de la lista de zonas insertadas en el archivo IFC, que se extraen del archivo y se muestran en un listado con la

posibilidad de seleccionar los sistemas de energía correspondientes a cada una de ellas. En el caso en estudio, todas las zonas están equipadas con sistemas de calefacción mediante radiadores.

#### **6.4.4.3 Objetivos, limitaciones y barreras**

Tras completar los datos relacionados con los edificios y sus sistemas de energía, se establece un conjunto de objetivos, umbrales límite y barreras que permiten completar la definición del problema formulado dentro de la herramienta. Los objetivos y umbrales límite están relacionados fundamentalmente con indicadores, mientras que las barreras están relacionadas con el potencial de implementación de ciertas MAES.

Para el caso en estudio, se ha establecido una inversión máxima de 950.000 €, mientras que el período de amortización deseado se establece en 18 años y el tiempo de amortización de la energía en 35 años.

Con respecto al cuestionario para establecer las barreras relacionadas con las MAES, el caso permite el aislamiento interno y externo de cerramientos y la modificación de ventanas y cubiertas, mientras que las medidas relacionadas con el aislamiento de la cubierta por el exterior han sido bloqueadas. Se permite la incorporación de fuentes de energía renovables, y se pueden instalar energía fotovoltaica y solar térmica, mientras que se indica que no hay espacio disponible para implementar calderas de biomasa. Finalmente, se permite la instalación de un sistema de control de energía para optimizar el rendimiento de los sistemas.

#### **6.4.4.4 Propuesta de MAES**

Después de completar el cuestionario que permite a los usuarios de la herramienta establecer un conjunto de condiciones de contorno relacionadas con barreras, la herramienta muestra un conjunto de MAES candidatas para formular los escenarios de rehabilitación. Los usuarios revisan y verifican en este punto las MAES propuestas para descartar o agregar medidas, mientras que pueden editar ciertos parámetros como los costes relacionados con la tecnología, su implementación o su mantenimiento. De las MAES propuestas para el caso en estudio, los enumerados en la Tabla 24 se han seleccionado como medidas candidatas para generar los escenarios de rehabilitación.

**Tabla 24.** MAES propuestas para el caso de estudio.

<b>Código MAES</b>	<b>Descripción</b>
AC.DE.BO.CD.01	Caldera de condensación de diésel (26 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.CD.02	Caldera de condensación de diésel (35 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.CD.03	Caldera de condensación de diésel (44 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.CD.04	Caldera de condensación de diésel (58 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.CD.05	Caldera de condensación de diésel (73 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.NG.01	Caldera de gas natural (15 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.NG.02	Caldera de gas natural (38 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.NG.03	Caldera de gas natural (53 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.NG.04	Caldera de gas natural (143 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.NG.05	Caldera de gas natural (239 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.NG.06	Caldera de gas natural (384 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.NG.01	Caldera de condensación de gas natural (18 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.CG.02	Caldera de condensación de gas natural (34 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.CG.03	Caldera de condensación de gas natural (49 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.CG.04	Caldera de condensación de gas natural (97 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.CG.05	Caldera de condensación de gas natural (208 kW capacidad nominal)
AC.DE.BO.CG.06	Caldera de condensación de gas natural (369 kW capacidad nominal)
PA.FA.EX.CS.01	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – EPS 50mm
PA.FA.EX.CS.02	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – EPS 100mm
PA.FA.EX.CS.03	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – EPS 120mm
PA.FA.EX.CS.04	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – EPS 150mm
PA.FA.EX.CS.05	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – EPS 200mm
PA.FA.EX.CS.06	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – EPS 250mm
PA.FA.EX.CS.07	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – Lana Mineral 80mm
PA.FA.EX.CS.08	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – Lana Mineral 100mm
PA.FA.EX.CS.09	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – Lana Mineral 120mm
PA.FA.EX.CS.10	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – XPS 100mm
PA.FA.EX.CS.11	Sistema de aislamiento térmico por el exterior – XPS 120mm
PA.OP.DG.DE.01	Doble acristalamiento con marco de aluminio
PA.OP.DG.DE.02	Doble acristalamiento con marco de PVC con tres cámaras
PA.OP.DG.DE.03	Doble acristalamiento con marco de PVC con cinco cámaras
PA.RO.PI.IN.01	Aislamiento interno en cubierta inclinada – Lana mineral 40mm
PA.RO.PI.IN.02	Aislamiento interno en cubierta inclinada – Lana mineral 60mm
PA.RO.PI.IN.03	Aislamiento interno en cubierta inclinada – Lana mineral 80mm
PA.RO.PI.IN.04	Aislamiento interno en cubierta inclinada – Lana mineral 100mm
PA.RO.TS.CI.01	Aislamiento en forjado de última planta – Lana mineral 100mm

Código MAES	Descripción
PA.RO.TS.CI.02	Aislamiento en forjado de última planta – Lana mineral 150mm
PA.RO.TS.CI.03	Aislamiento en forjado de última planta – Lana mineral 200mm
PA.RO.TS.CI.04	Aislamiento en forjado de última planta – Lana mineral 250mm
CO.DE.PL.LF.01	Control de seguimiento de cargas
CO.DE.PL.TV.01	Válvulas termostáticas en radiadores
CO.DE.TH.OS.01	Control óptimo de encendido y apagado de calefacción
CO.DE.TH.OS.02	Control óptimo de encendido y apagado de refrigeración
CO.DE.PL.SC.01	Programación del sistema de calefacción
CO.DE.PL.SC.03	Programación del sistema de refrigeración
RE.RO.SC.PV.01	Panel fotovoltaico mono-cristalino conectado a red
RE.RO.SC.PV.02	Panel fotovoltaico poli-cristalino conectado a red
RE.RO.SC.PV.03	Panel fotovoltaico de silicio amorfo conectado a red
RE.RO.SC.TC.01	Colector solar plano
RE.RO.SC.TC.02	Colector solar de tubos de vacío

#### 6.4.4.5 Criterios de priorización

Se han utilizado tres esquemas de priorización para evaluar y optimizar los escenarios de rehabilitación de acuerdo con los pesos que se muestran en la Tabla 23. Estos esquemas son:

- Esquema 1: Prioridad para lograr un distrito de energía casi nula.
- Esquema 2: Prioridad para lograr un distrito neutro en carbono.
- Esquema 4: Prioridad a la generación de energía a través de energías renovables (fotovoltaica y solar térmica).

La selección de estos escenarios se debe al hecho de que representan un abanico relativamente representativo, mientras que el que maximiza la producción a través de red de calor no se ha considerado ya que las partes involucradas en este proyecto no consideran esta medida debido a las barreras existentes para su implementación.

#### 6.4.5 Lanzamiento del proceso de optimización y visualización de resultados

Una vez que se insertan todos los datos, la herramienta permite iniciar el proceso de optimización. Para cada uno de los esquemas de priorización, el proceso de optimización se lanzó para 10 iteraciones de 10 escenarios cada una, como se muestra en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Características del proceso de optimización lanzado.

Esquema de priorización	Número de iteraciones	Escenarios evaluados	Escenarios en el frente de Pareto	Tiempo de optimización (minutos)
1	10	100	4	1.100
2	10	100	2	775
4	10	100	5	913

## 6.5 Resultados

### 6.5.1 Condiciones pre-existentes

Los valores de los indicadores de la línea base para el caso en estudio se muestran en la siguiente Tabla 26. Solo se presentan los valores de los indicadores utilizados para la optimización, mientras que los valores de los indicadores restantes se pueden encontrar en [145].

**Tabla 26.** Valores de los indicadores para las condiciones pre-existentes en Cuatro de Marzo.

	Indicador	Unidades	Valor	
COSTE	ENV01	Potencial de calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> /año	57,69
	ENV04	Consumo de energía primaria	MJ/m <sup>2</sup> /año	1237,33
	ENV06	Periodo de amortización de la energía	años	n/a
	ECO02	Inversión	€/m <sup>2</sup>	n/a
	ECO03	Coste de ciclo de vida	€	7.665.852,49
	ECO05	Periodo de amortización	años	n/a
BENEFICIO 1	ENE01	Demanda energética	kWh/m <sup>2</sup> -año	89,31
	ENE02	Consumo de energía final	kWh/m <sup>2</sup> -año	151,80
	ENE06	Consumo de energía fósil	kWh/m <sup>2</sup> -año	151,80
	ENE09	% energía final cubierta por renovables	%	0,00
	ENE13	Uso de energía de redes de calor	kWh/m <sup>2</sup> -año	0,00
	COM01	Confort térmico local	Nivel	0
BENEFICIO 2	ENE14	Uso de energía de biomasa	kWh/m <sup>2</sup> -año	0,00
	ENE15	Uso de energía de fotovoltaica	kWh/m <sup>2</sup> -año	0,00
	ENE16	Uso de energía de solar térmica	kWh/m <sup>2</sup> -año	0,00
	ENE17	Uso de energía de hidráulica	kWh/m <sup>2</sup> -año	0,00
	ENE18	Uso de energía de mini-eólica	kWh/m <sup>2</sup> -año	0,00
	ENE19	Uso de energía de geotermia	kWh/m <sup>2</sup> -año	0,00



## 6.5.2 Escenarios candidatos propuestos en el marco de cada esquema de priorización

Como resultado del proceso de optimización, la herramienta propone un conjunto de MAES de los propuestos como medidas candidatas para generar los escenarios de rehabilitación energética. La Tabla 27, la Tabla 28 y la Tabla 29 muestran las MAES propuestas para cada escenario bajo los tres esquemas de priorización propuestos.

**Tabla 27.** MAES propuestas para el esquema de priorización 1.

Escenario	Edificio 1	Edificio 2	Edificio 3	Edificio 4	Edificio 5
Escenario 1	FA.EX.CS.06	FA.EX.CS.09	FA.EX.CS.11	FA.EX.CS.10	FA.EX.CS.02
	RO.PI.IN.05	RO.PI.IN.01	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.02
	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.02
	RO.SC.PV.01.65	DE.BO.NG	DE.BO.CG	DE.BO.CD	RO.SC.PV.01.75
	RO.SC.TC.02.35	RO.SC.PV.02.80	RO.SC.PV.01.60	RO.SC.PV.03.85	RO.SC.TC.01.25
	DE.TH.SS	RO.SC.TC.01.20	RO.SC.TC.01.25	RO.SC.TC.02.15	DE.PL.LF
	DE.PL.LF	DE.TH.OS	DE.PL.LF	DE.PL.TV	DE.PL.TV
Escenario 2	FA.EX.CS.06	FA.EX.CS.04	FA.EX.CS.11	FA.EX.CS.10	FA.EX.CS.05
	RO.PI.IN.03	RO.PI.IN.01	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.03	RO.PI.IN.04
	OP.DG.DE.03	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.01	OP.DG.DE.01	OP.DG.DE.01
	RO.SC.PV.02.35	DE.BO.CD	DE.BO.CD	DE.BO.CG	DE.BO.CG
	RO.SC.TC.02.10	RO.SC.PV.01.95	RO.SC.PV.02.10	RO.SC.PV.02.90	RO.SC.PV.01.90
	DE.TH.OS	RO.SC.TC.02.5	RO.SC.TC.02.80	RO.SC.TC.02.10	RO.SC.TC.02.10
		DE.TH.OS	DE.TH.OS	DE.PL.TV	DE.TH.OS
		DE.PL.LF		DE.PL.TV	

**Tabla 28.** MAES propuestas para el esquema de priorización 2.

Escenario	Edificio 1	Edificio 2	Edificio 3	Edificio 4	Edificio 5
Escenario 1		FA.EX.CS.11			
		RO.PI.IN.01		FA.EX.CS.07	FA.EX.CS.09
	FA.EX.CS.06	RO.TS.CI.02	FA.EX.CS.08	RO.PI.IN.01	RO.PI.IN.04
	RO.PI.IN.04	OP.DG.DE.02	RO.PI.IN.03	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.01
	OP.DG.DE.03	DE.BO.NG	OP.DG.DE.02	DE.BO.NG	DE.BO.CG
	RO.SC.PV.02.95	RO.SC.PV.01.90	DE.BO.CG	RO.SC.PV.02.35	DE.BO.CG
	RO.SC.TC.01.5	RO.SC.TC.02.10	RO.SC.PV.02.95	RO.SC.TC.02.15	RO.SC.PV.02.35
	DE.TH.SS	RO.SC.TC.02.10	RO.SC.TC.02.5	RO.SC.TC.02.15	RO.SC.TC.01.55
	DE.TH.OS	DE.TH.SS	DE.TH.OS	DE.PL.TV	
	DE.PL.LF		DE.PL.TV		
	DE.PL.TV				
Escenario 2	FA.EX.CS.01		FA.EX.CS.09	FA.EX.CS.07	
	RO.PI.IN.04	FA.EX.CS.10	RO.PI.IN.03	RO.PI.IN.04	FA.EX.CS.06
	OP.DG.DE.03	RO.PI.IN.02	OP.DG.DE.03	OP.DG.DE.02	RO.PI.IN.02
	DE.BO.CD	RO.TS.CI.02	DE.BO.CG	DE.BO.CD	OP.DG.DE.01
	RO.SC.PV.03.90	OP.DG.DE.02	RO.SC.PV.02.75	RO.SC.PV.01.85	DE.BO.CG
	RO.SC.TC.01.10	RO.SC.PV.02.85	RO.SC.TC.01.25	RO.SC.TC.01.15	RO.SC.PV.02.55
	DE.TH.OS	RO.SC.TC.02.15	DE.TH.SS	DE.TH.SS	RO.SC.TC.01.45
	DE.PL.TV		DE.PL.LF	DE.PL.LF	DE.PL.TV
			DE.PL.TV		
Escenario 3	FA.EX.CS.04	FA.EX.CS.11	FA.EX.CS.08	FA.EX.CS.07	FA.EX.CS.09
	RO.PI.IN.03	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.04	RO.PI.IN.04
	OP.DG.DE.03	RO.TS.CI.02	OP.DG.DE.03	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.03
	DE.BO.CD	OP.DG.DE.01	DE.BO.CG	DE.BO.CG	DE.BO.NG
	RO.SC.PV.03.15	DE.BO.CD	RO.SC.PV.03.45	DE.BO.CG	RO.SC.PV.03.65
	RO.SC.TC.02.85	RO.SC.PV.02.55	RO.SC.TC.01.30	RO.SC.PV.01.90	RO.SC.TC.01.35
	DE.TH.SS	RO.SC.TC.02.35	DE.TH.SS	RO.SC.TC.01.10	DE.TH.OS
	DE.PL.TV	DE.TH.SS	DE.PL.TV	DE.TH.SS	DE.PL.TV
	DE.PL.LF				
Escenario 4	FA.EX.CS.02	FA.EX.CS.11	FA.EX.CS.08	FA.EX.CS.07	FA.EX.CS.05
	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.03	RO.PI.IN.03	RO.PI.IN.04	RO.PI.IN.04
	OP.DG.DE.02	RO.TS.CI.04	OP.DG.DE.03	OP.DG.DE.01	OP.DG.DE.02
	DE.BO.NG	OP.DG.DE.03	DE.BO.CG	DE.BO.NG	DE.BO.CG
	RO.SC.PV.03.40	RO.SC.PV.02.95	RO.SC.PV.02.25	RO.SC.PV.02.60	RO.SC.PV.01.80
	RO.SC.TC.01.45	RO.SC.TC.02.5	RO.SC.TC.01.75	RO.SC.TC.02.40	RO.SC.TC.02.20
	DE.TH.OS	DE.TH.OS	DE.PL.LF	RO.SC.TC.02.40	DE.TH.OS
	DE.PL.LF	DE.PL.LF	DE.PL.TV	DE.TH.SS	DE.PL.LF
Escenario 5	FA.EX.CS.06	FA.EX.CS.05		FA.EX.CS.03	FA.EX.CS.05
	RO.PI.IN.04	RO.PI.IN.02	FA.EX.CS.08	RO.PI.IN.01	RO.PI.IN.03
	OP.DG.DE.03	RO.TS.CI.01	RO.PI.IN.01	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.02
	DE.BO.NG	OP.DG.DE.01	OP.DG.DE.03	DE.BO.CD	DE.BO.CG
	RO.SC.PV.01.55	DE.BO.CD	DE.BO.CG	RO.SC.PV.02.30	RO.SC.PV.01.65
	RO.SC.TC.02.45	RO.SC.PV.02.90	RO.SC.PV.02.55	RO.SC.TC.02.40	RO.SC.TC.02.35
	DE.TH.SS	RO.SC.TC.01.10	RO.SC.TC.02.45	DE.TH.SS	DE.PL.LF
	DE.PL.LF	DE.PL.LF	DE.PL.LF	DE.PL.TV	DE.PL.TV

**Tabla 29. MAES propuestas para el esquema de priorización 3.**

Escenario	Edificio 1	Edificio 2	Edificio 3	Edificio 4	Edificio 5
Escenario 1	FA.EX.CS.06	FA.EX.CS.06	FA.EX.CS.05	FA.EX.CS.01	FA.EX.CS.06
	RO.PI.IN.04	RO.PI.IN.01	RO.PI.IN.01	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.03
	RO.TS.CI.01	OP.DG.DE.03	RO.TS.CI.04	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.02
	OP.DG.DE.01	DE.BO.CG	OP.DG.DE.03	DE.BO.CG	DE.BO.CD
	DE.BO.CG	RO.SC.PV.03.90	DE.BO.NG	RO.SC.PV.01.65	RO.SC.PV.03.55
	RO.SC.PV.03.85	RO.SC.TC.02.5	RO.SC.PV.02.90	RO.SC.TC.02.10	RO.SC.TC.01.15
	RO.SC.TC.01.15	DE.TH.SS	RO.SC.TC.01.10	DE.TH.SS	DE.TH.SS
	DE.TH.OS	DE.PL.LF	DE.TH.OS	DE.PL.LF	DE.PL.LF
	DE.PL.LF	DE.PL.TV	DE.PL.LF	DE.PL.TV	DE.PL.TV
	DE.PL.TV		DE.PL.TV		
	Escenario 2	FA.EX.CS.06	FA.EX.CS.06	FA.EX.CS.11	FA.EX.CS.02
RO.PI.IN.04		RO.PI.IN.01	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.03	RO.PI.IN.03
RO.TS.CI.02		OP.DG.DE.02	RO.TS.CI.01	OP.DG.DE.01	OP.DG.DE.02
OP.DG.DE.01		RO.SC.PV.02.95	OP.DG.DE.03	DE.BO.CG	DE.BO.NG
DE.BO.CG		RO.SC.TC.02.5	RO.SC.PV.02.70	RO.SC.PV.01.20	RO.SC.PV.02.80
RO.SC.PV.02.95		DE.TH.OS	RO.SC.TC.01.30	RO.SC.TC.01.55	RO.SC.TC.02.20
RO.SC.TC.01.5		DE.PL.TV	DE.PL.LF	DE.TH.SS	DE.TH.OS
Escenario 3	FA.EX.CS.10	FA.EX.CS.02	FA.EX.CS.05		FA.EX.CS.07
	RO.PI.IN.04	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.01	FA.EX.CS.09	RO.PI.IN.02
	RO.TS.CI.01	OP.DG.DE.02	RO.TS.CI.04	RO.PI.IN.02	OP.DG.DE.01
	OP.DG.DE.02	DE.BO.CG	OP.DG.DE.03	OP.DG.DE.01	DE.BO.CD
	DE.BO.CG	RO.SC.PV.02.85	RO.SC.PV.01.95	RO.SC.PV.02.60	RO.SC.PV.03.30
	RO.SC.PV.02.65	RO.SC.TC.02.15	RO.SC.TC.01.5	RO.SC.TC.02.15	RO.SC.TC.01.60
	RO.SC.TC.01.35	DE.TH.OS	DE.TH.OS	DE.PL.TV	DE.TH.SS
		DE.PL.LF	DE.PL.LF		
Escenario 4	FA.EX.CS.06	FA.EX.CS.02	FA.EX.CS.09	FA.EX.CS.02	FA.EX.CS.06
	RO.PI.IN.04	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.04
	RO.TS.CI.02	OP.DG.DE.02	RO.TS.CI.01	OP.DG.DE.01	OP.DG.DE.02
	OP.DG.DE.02	DE.BO.NG	OP.DG.DE.02	DE.BO.NG	DE.BO.CD
	DE.BO.CG	RO.SC.PV.02.80	DE.BO.CG	RO.SC.PV.03.5	RO.SC.PV.02.15
	RO.SC.PV.02.90	RO.SC.TC.02.20	RO.SC.PV.02.90	RO.SC.TC.02.60	RO.SC.TC.01.85
	RO.SC.TC.01.10	DE.TH.SS	RO.SC.TC.01.10	DE.TH.OS	DE.TH.SS
	DE.PL.LF	DE.PL.LF	DE.TH.OS	DE.PL.LF	DE.PL.TV
	DE.PL.TV			DE.PL.TV	

### 6.5.3 Valores de las funciones coste y beneficio para cada esquema de priorización

La Tabla 30 y la Figura 25 muestran los valores de los indicadores a nivel de distrito para los 5 escenarios principales propuestos en cada esquema de priorización de los seleccionados para esta validación.

**Tabla 30.** Valores de los indicadores para los escenarios del frente de Pareto bajo los tres esquemas de priorización.

		Esquema 1 (EECN)		Esquema 2 (neutro en carbono)					Esquema 4 (generación con EERR)				
Indicador	Base	1	2	1	2	3	4	5	1	2	3	4	
COSTE	ENV01	57,69	40,22	39,94	40,01	39,50	42,27	41,30	41,24	40,85	40,73	41,37	41,70
	ENV04	1237,33	874,72	868,70	877,56	863,23	930,02	905,38	906,60	896,57	880,88	899,48	916,46
	ENV06	n/a	3,69	4,48	3,54	3,53	3,59	4,24	4,50	3,07	4,11	3,92	3,80
	ECO02	n/a	128,95	138,19	134,19	138,45	150,24	155,56	152,26	121,36	134,79	136,50	141,99
	ECO03	7,6*10 <sup>6</sup>	11,6*10 <sup>6</sup>	12,2*10 <sup>6</sup>	9,7*10 <sup>6</sup>	10,9*10 <sup>6</sup>	10,9*10 <sup>6</sup>	10,8*10 <sup>6</sup>	11,6*10 <sup>6</sup>	11,3*10 <sup>6</sup>	11,4*10 <sup>6</sup>	11,7*10 <sup>6</sup>	12,3*10 <sup>6</sup>
	ECO05	n/a	9,13	8,21	9,45	9,54	11,45	11,37	11,02	8,85	10,08	10,24	10,74
BENEFICIO 1	ENE01	89,31	60,37	58,78	60,19	59,17	63,66	61,85	61,39	61,72	62,83	62,97	63,32
	ENE02	151,80	86,24	83,98	85,98	84,52	90,94	88,36	87,70	88,18	89,76	89,95	90,46
	ENE06	151,80	37,60	33,64	44,10	37,65	28,10	24,31	21,18	59,38	40,64	39,63	28,99
	ENE09	0,00	56,40	59,94	48,71	55,45	69,10	72,49	75,85	32,66	54,73	55,94	67,95
	ENE13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	COM01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BENEFICIO 2	ENE14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ENE15	0,00	23,10	23,19	21,61	23,69	15,91	19,38	19,23	19,44	24,84	21,66	18,96
	ENE16	0,00	25,54	27,14	20,28	23,18	46,93	44,67	47,29	9,36	24,29	28,65	42,51
	ENE17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ENE18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ENE19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Coste relativo	n/a	0,947	0,990	2,829	2,913	2,998	3,051	3,101	0,483	0,499	0,539	0,560	
Beneficio relativo	n/a	0,947	0,990	0,742	0,754	0,771	0,782	0,793	1,025	1,026	1,040	1,056	

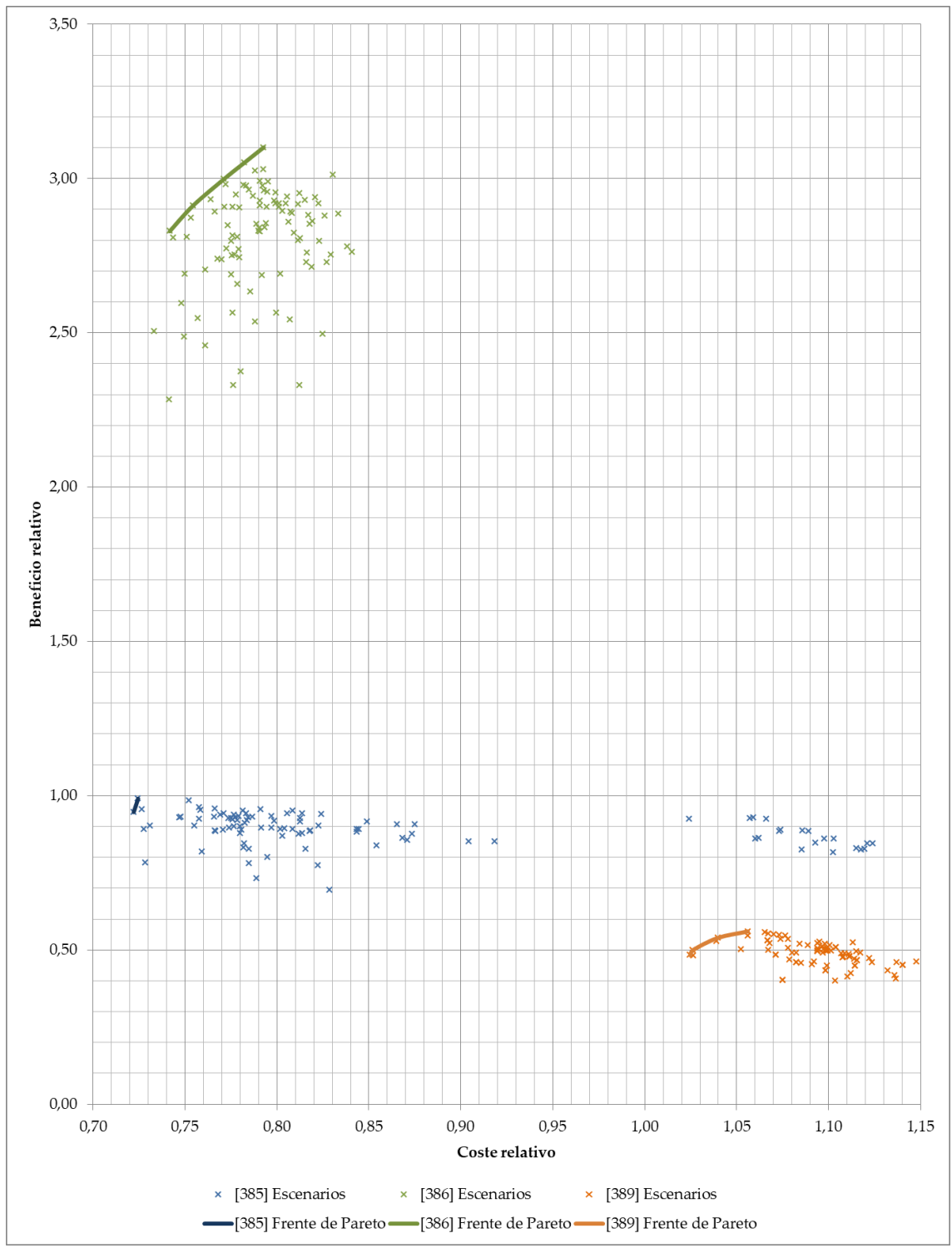


Figura 25. Representación gráfica de los escenarios en cada esquema de priorización.

#### 6.5.4 Validación de los resultados con datos reales de operación

Con el fin de garantizar la validez del modelo propuesto, se ha llevado a cabo un proceso de validación utilizando datos reales recopilados del caso de estudio para las situaciones previa y posterior a la rehabilitación. Los datos utilizados para la validación se han recopilado de las facturas de energía para la situación previa a la rehabilitación y de sistemas de monitorización para el escenario posterior a la modificación.

De los diversos esquemas de priorización utilizados para evaluar los escenarios candidatos de rehabilitación, el primer esquema (prioridad para lograr un distrito de energía casi nula) ha sido el seleccionado para esta validación, ya que es el más cercano al enfoque considerado al diseñar el proyecto de rehabilitación que se implementó en el distrito.

La siguiente Tabla 31 muestra los valores de los indicadores para el proyecto de rehabilitación real implementado en comparación con los dos escenarios propuestos por la herramienta bajo el esquema de priorización.

Como se puede observar en los resultados mostrados, existen discrepancias relevantes en algunos valores, como el potencial de calentamiento global (ENV01), el consumo de energía primaria (ENV04) y la demanda de energía (ENE01). El potencial de calentamiento global se calcula directamente a partir del consumo de energía primaria, utilizando los factores de conversión establecidos para los diferentes usos de energía en el distrito. La diferencia en el consumo de energía primaria se deriva del hecho de que en los valores calculados a partir de los datos medidos, solo se considera la energía operativa, mientras que para los datos simulados con la herramienta se consideran tanto la energía operativa como la energía incorporada. Esto también explica que la reducción relativa del indicador ENV04 es mayor en el proyecto real ejecutado (60%) que en los escenarios simulados (31%), ya que en el último caso se considera la energía incorporada en los materiales para implementar el escenario de rehabilitación.

En la categoría de indicadores de energía, como se indica anteriormente, hay desviaciones en los valores para la demanda de energía térmica (ENE01) y el consumo final de energía (ENE02). Debe tenerse en cuenta que si bien para el proyecto real, tanto la demanda como el consumo de energía muestran los valores de la energía térmica, en el caso de la herramienta, el valor del consumo incluye también el consumo de electricidad principalmente para cubrir los requisitos de iluminación (sin incluir equipos). Con estas consideraciones, la diferencia entre los valores del proyecto real y la herramienta es de alrededor de un 20%, que a pesar de ser relativamente alto, aún es inferior a las prácticas existentes [146].

**Tabla 31.** Comparación de los valores de los indicadores de las simulaciones y datos reales de operación.

	Datos medidos		Datos simulados			
	Línea base medida	Estado posterior medido	Línea base simulada	Escenario óptimo 1	Escenario óptimo 2	
ENV01	36,73*	14,40*	57,69	40,22	39,94	
ENV04	640,80*	255,60*	1237,33	874,72	868,70	
COSTE	ENV06	n/a	-	n/a	3,69	4,48
	ECO02	n/a	164,82	n/a	128,95	138,19
	ECO03	-	-	7,6*10 <sup>6</sup>	11,6*10 <sup>6</sup>	12,2*10 <sup>6</sup>
	ECO05	n/a	12	n/a	9,13	8,21
	ENE01	120,75	61,70	89,31	60,37	58,78
BENEFICIO 1	ENE02	167,25	66,91	151,80	86,24	83,98
	ENE06	167,25	54,71	151,80	37,60	33,64
	ENE09	0,00	18,23	0,00	56,40	59,94
	ENE13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	COM01	0	0	0	0	0
	ENE14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BENEFICIO 2	ENE15	0,00	0,00	0,00	23,10	23,19
	ENE16	0,00	12,20	0,00	25,54	27,14
	ENE17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ENE18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	ENE19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

\* Solo considerando la energía operacional.

Con respecto a las MAES propuestos por la herramienta y los implementados en el proyecto de rehabilitación real, la Tabla 32 muestra la comparación de estos. De los dos escenarios propuestos por el procedimiento de evaluación, el que muestra un beneficio relativo más alto para un coste relativo ligeramente más superior (escenario 2) ha sido el seleccionado para fines de comparación.

Debe tenerse en cuenta que, mientras que en el proyecto de rehabilitación llevado a cabo se implementaron las mismas MAES a todos los edificios, la herramienta considera diferentes MAES para cada uno de ellos, dirigiendo el problema de optimización desde la perspectiva del distrito donde el objetivo es la optimización de los edificios en su conjunto, en lugar de cada edificio individual por separado.

**Tabla 32.** Comparación de las MAES propuestas en el escenario rehabilitado y el óptimo propuesto.

Escenario rehabilitado	MAES propuestas (esquema 1, escenario 2)				
	Edificio 1	Edificio 2	Edificio 3	Edificio 4	Edificio 5
FA.EX.CS.06	FA.EX.CS.06	FA.EX.CS.09	FA.EX.CS.11	FA.EX.CS.10	FA.EX.CS.02
RO.TS.CI.01	RO.PI.IN.03	RO.PI.IN.01	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.02	RO.PI.IN.02
OP.DG.DE.01	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.02	OP.DG.DE.02
DE.BO.NG	-	DE.BO.NG	DE.BO.CG	DE.BO.CD	
RO.SC.TC.01	RO.SC.PV.01	RO.SC.PV.02	RO.SC.PV.01	RO.SC.PV.03	RO.SC.PV.01
RO.SC.TC.02	RO.SC.TC.02	RO.SC.TC.01	RO.SC.TC.01	RO.SC.TC.02	RO.SC.TC.01
-	DE.TH.SS	DE.TH.OS	DE.PL.LF	DE.PL.TV	DE.PL.LF
	DE.PL.LF				DE.PL.TV

## 6.6 Discusión

En este estudio, se ha demostrado la utilización de técnicas de toma de decisiones multi-criterio para optimizar el diseño de proyectos de rehabilitación energética de edificios. Esto se ha implementado mediante el despliegue de esquemas de ponderación que se basan en la comparación de la importancia relativa de los indicadores por pares, y que permiten agruparlos en dos índices que representan los beneficios y los costes, lo que permite implementar una optimización bi-objetivo. Se han llevado a cabo tres experimentos para comparar los resultados obtenidos mediante el uso de tres esquemas de ponderación diferentes.

Estos experimentos se han configurado para la evaluación de 10 iteraciones con 10 escenarios cada una, lo que resulta en la evaluación de 100 escenarios para cada esquema. Aunque esto no asegura la convergencia hasta la identificación de los escenarios óptimos, permite la validación de los esquemas a través de la comparación de aquellos propuestos como los mejores de estas poblaciones.

Como se puede observar en la representación de los frentes de Pareto, la distribución de escenarios muestra grandes diferencias para los tres escenarios, aunque los valores de los indicadores para algunos de ellos son bastante similares. Esto se explica por el hecho de la forma en que se ponderan los indicadores y la importancia que se les da, derivando en valores para el coste relativo que oscilan entre 0,72 y 1,35, y para los beneficios relativos entre 0,35 y 3,15.

En términos de los escenarios obtenidos, para el primer esquema (prioridad para lograr un distrito de energía casi nula) dos escenarios se consideran las mejores opciones, mientras



que el segundo esquema (prioridad para lograr un distrito neutro en carbono) y el cuarto esquema (prioridad para la generación de energía a través de renovables), han resultado cinco y cuatro escenarios respectivamente como mejores escenarios identificados por el módulo de optimización. A partir del análisis de los indicadores para estos escenarios, se puede observar que los valores del consumo de energía para el logro de un distrito neutro en carbono o priorizar la generación de energía a través de energías renovables son mayores, mientras que para lograr un distrito de energía casi cero, la herramienta solo propone escenarios con un consumo final de energía reducido a 83-86 kWh/m<sup>2</sup>a, y una cobertura de renovables del 56-59%. Por lo tanto, para los otros dos esquemas, se proponen escenarios con menos contribución de renovables para valores similares de consumo de energía final después de la rehabilitación.

En cuanto a la configuración de los escenarios, para casi todos los escenarios candidatos, se incluyen MAES pasivas para la fachada, la cubierta y las aberturas, buscando reducir la demanda de los edificios antes de modificar los sistemas de energía. También se proponen fuentes de energía renovables para todos los escenarios, combinando energía fotovoltaica y solar térmica de acuerdo con la superficie disponible dentro de los edificios y con el objetivo de optimizar el balance energético de todo el distrito, equilibrando así la producción a través de renovables entre los edificios. Sin embargo, con respecto a los sistemas activos, la herramienta propone para la mayoría de los escenarios la modificación de los sistemas existentes en algunos de los edificios, y no en todos. El número de escenarios considerados para la optimización afecta esta selección, donde un mayor número de escenarios conduciría a alternativas candidatas con MAES convergentes bajo la misma tipología de construcción. Además, la optimización a nivel de distrito afecta la selección de MAES, donde los objetivos a alcanzar y la evaluación consideran a todo el grupo de edificios como una entidad energética única. Esto puede llevar a propuestas que pueden mostrar situaciones desequilibradas para ciertos edificios individuales, pero que ofrecen los mejores resultados para el distrito bajo las condiciones de contorno que se han establecido.

Al comparar los mejores escenarios propuestos por la herramienta y el proyecto real implementado, se puede concluir que están en línea para la mayoría de las estrategias, mostrando sin embargo algunas pequeñas discrepancias. En la categoría pasiva, las medidas propuestas son: aislamiento de fachadas por el exterior, aislamiento de forjado de última planta y cambio de ventanas. Mientras que para la categoría de ventanas se propone la misma para los 5 edificios con mejores valores U que los implementados en la realidad (1,68 W/m<sup>2</sup>K contra 2,7 W/m<sup>2</sup>K en el proyecto real), en términos de aislamiento de cubierta y fachada los

espesores propuestos son menores que en la realidad. Esto es causado por el número de escenarios evaluados, donde un mayor número de alternativas candidatas conduciría a obtener las mismas MAES o muy similares para las mismas tipologías.

En la categoría de renovables, la herramienta propone instalar tanto PV como energía solar térmica en diferentes porcentajes dependiendo del edificio y la superficie disponible. Sin embargo, el proyecto ejecutado ha incluido la instalación de energía solar térmica en los edificios rehabilitados como fuente única. Esto se explica por el hecho de que en el proyecto ejecutado, los propietarios bloquearon la implementación de tecnologías fotovoltaicas mientras que en la herramienta, para fines de evaluación, se permitió la evaluación de esta medida con objeto de analizar los impactos de implementar diferentes tecnologías para la producción renovable.

Para las MAES activas, se propone la modificación de calderas en las viviendas de los edificios en tipología de bloque, mientras que no en las torres. En este caso, la herramienta ha priorizado la integración de renovables sobre el cambio de todos los sistemas activos en el distrito.

Con respecto a la comparación de indicadores, como se puede observar dentro de la Tabla 31, los valores obtenidos a través de la plataforma son bastante similares para la línea base con algunas discrepancias debido a las consideraciones para el cálculo del potencial de calentamiento global o consumo de energía primaria desde una perspectiva ambiental. Las desviaciones reflejadas para el consumo de energía final y la demanda de energía son de alrededor del 20%, lo que se considera aceptable ya que la herramienta considera algunas condiciones fijas como la ocupación o las consignas de temperatura, mientras que el consumo real depende en gran medida de las modificaciones en estos parámetros.

Para la evaluación de los escenarios candidatos propuestos, se puede observar que los valores están en rangos similares a los implementados en la realidad con algunas discrepancias en los mismos indicadores mencionados anteriormente para la línea base. En el caso del consumo de energía final se puede observar que es ligeramente mayor en los escenarios propuestos por la herramienta que en el implementado en la realidad. Este hecho se debe a las diferencias en algunas de las medidas de ahorro propuestas, con una menor reducción en el consumo pero una mayor contribución de fuentes renovables.

Quizás las diferencias más notables están en las inversiones, que son significativamente menores para los escenarios candidatos propuestos por la herramienta que

en el implementado. Esto se explica por el hecho de que la herramienta propone no cambiar todas las calderas, como se menciona anteriormente, lo que resulta en una inversión menor para ahorros ligeramente menores en términos de consumo final de energía, pero mayores ahorros en términos de consumo de energía de fuentes fósiles, lo que conduce a una reducción de los periodos de amortización. La mayor reducción de consumo de energía de fuentes fósiles resulta de la integración de la producción combinada térmica y fotovoltaica, mientras que en el proyecto implementado solo se consideró la energía térmica debido a las restricciones establecidas por los usuarios. Si bien la herramienta podría haber incluido estas restricciones para evitar escenarios con fotovoltaica como tecnología propuesta, se ha mantenido para permitir una generación de escenarios candidatos de rehabilitación más amplia.

## 6.7 Conclusiones y líneas futuras

Este artículo presenta el desarrollo y la implementación de una herramienta que integra un procedimiento de evaluación para el soporte a toma de decisiones cuando se llevan a cabo proyectos de rehabilitación energética. Si bien el procedimiento tradicional considera la evaluación de un número reducido de MAES debido al tiempo y a los conocimientos requeridos para su modelado y análisis, esta herramienta ofrece una forma automatizada de generar y evaluar las alternativas de escenarios candidatos de rehabilitación. Además, el procedimiento planteado conduce a la reducción de errores al generar múltiples modelos mediante el uso de un modelo de datos común y la implementación del marco de interoperabilidad.

Dentro de esta herramienta, el esquema de evaluación desempeña un papel fundamental al establecer los mecanismos para transformar los criterios subjetivos en un problema matemático para proporcionar el mejor conjunto de escenarios candidatos a las partes interesadas. Esto se logra a través de la integración de técnicas basadas en MCDA y la evaluación bi-objetivo en un método de evaluación único que calcula los costes y beneficios de cada escenario donde los costes y beneficios son una agregación de indicadores calculados a escala de distrito.

Los experimentos realizados dentro de este estudio han demostrado la viabilidad de la utilización de este método para identificar los mejores escenarios para un distrito caracterizado por un conjunto de elementos como la geometría, sistemas, objetivos, condiciones de contorno o prioridades. Mediante la comparación de los escenarios simulados por la herramienta (tanto para la línea base como para los escenarios propuestos como óptimos para la rehabilitación) con los datos medidos reales en los edificios considerados para el estudio, se puede concluir

que la herramienta y el método de evaluación son adecuados para comparar de manera efectiva escenarios de rehabilitación y seleccionar los más adecuados de acuerdo con un conjunto de condiciones de contorno establecidas.

Por lo tanto, como se muestra en este artículo, la metodología que se ha implementado dentro de este sistema de evaluación sirve de soporte a las partes interesadas en la toma de decisiones al abordar proyectos de rehabilitación energética. Un aspecto importante de este método, y también de la herramienta completa, es que depende en gran medida de los datos de entrada proporcionados por los usuarios en términos tanto de la información que permite modelar el distrito como de la configuración del problema en términos de la definición de prioridades, condiciones límite u objetivos.

Como trabajo futuro, este método debe evaluarse a través de nuevos casos que permitirán mejorar el procedimiento para un mayor número de edificios, MAES y con diferentes configuraciones de prioridades (no solo los esquemas predefinidos sino también con los esquemas producidos por los usuarios del herramienta).



**CONCLUSIONES**

*CONCLUSIONS*



## 7 Conclusiones

La rehabilitación energética de edificios es uno de los elementos clave en la transición hacia una economía descarbonizada, contribuyendo a mejorar la sostenibilidad de nuestras ciudades, así como su resiliencia. El proyecto de rehabilitación energética se enfrenta a todavía grandes barreras que dificultan el escalado y el potencial de repetición de los proyectos que permiten mejorar los edificios tanto desde el punto de vista energético como de las condiciones de confort. Entre estas barreras se encuentran aspectos técnicos, económicos o legislativos. Pero, además, surgen otros aspectos del propio proceso que hacen que los intereses de los diferentes agentes, la escasa comunicación y colaboración entre ellos o el uso de herramientas con un muy bajo nivel de interoperabilidad resulten en proyectos que no siempre logran los objetivos deseados provocando el incremento en los costes o un peor comportamiento de los edificios que el esperado. Así, la rehabilitación energética se percibe por los residentes como algo que “va a salir mal”, donde seguramente aparecerán retrasos, sobrecostes, o no se lograrán las reducciones esperadas. Por lo tanto, se produce un efecto que genera incertidumbre de cara a facilitar las inversiones en estos proyectos.

Se han identificado así dos elementos que pueden contribuir a desbloquear algunas de las barreras de las mencionadas: la cuestión de la escala y la mejora del proceso mediante la interacción entre los agentes. Estos dos elementos deben necesariamente combinarse con una mejora continua del resto de aspectos como la actualización constante del marco regulatorio o de las cuestiones económicas como la fiscalidad para adaptarse a las realidades del sector. Sin embargo, estos aspectos no son objeto de la presente tesis doctoral.

Así, esta investigación ha trabajado en el desarrollo de una metodología que permita integrar un salto en la escala para maximizar los beneficios técnicos o económicos y, a su vez, generar un sistema que facilite la interacción entre los agentes involucrados en el proceso a través de métodos que fomenten la toma de decisiones consensuada.



A continuación se incluyen las principales conclusiones obtenidas a través del desarrollo de la investigación en relación al cumplimiento de los objetivos, a la metodología y a los resultados.

## 7.1 Conclusiones en relación al cumplimiento de los objetivos

La presente tesis doctoral se planteó en base a tres objetivos principales acompañados de sub-objetivos específicos según se describe en la sección 2.2 (Objetivos). A continuación se detallan las principales conclusiones en referencia a los objetivos y sub-objetivos:

- ***Objetivo 1: Desarrollo de una metodología de evaluación de alternativas de rehabilitación energética de barrios a través de cálculo de indicadores y un sistema de ponderación multi-criterio dinámico basado en estrategias colaborativas.***

La investigación llevada a cabo ha permitido el diseño de una metodología que permite integrar elementos para automatizar ciertos procesos como la evaluación y la comparación de alternativas de diseño. La metodología se basa en la integración de un sistema de indicadores, generado a partir de la evaluación de esquemas de indicadores existentes, que sirve de base a un método de evaluación multi-criterio, donde se han integrado diferentes técnicas de ponderación. Así, en una primera versión de la metodología se estableció un sistema estático de ponderación basado en las opiniones de un panel de expertos y recogidos a través de técnicas de lógica difusa. Esta primera aproximación sirvió para la evaluación de la idoneidad de la aplicación de sistemas de ponderación para resolver el problema de la búsqueda de los mejores escenarios de rehabilitación energética, como soporte a la toma de decisiones.

Esta metodología se fue mejorando a través de la integración de técnicas multi-criterio que permitiesen hacer dinámico el esquema de ponderación mediante dos procedimientos: (a) la simplificación del establecimiento de prioridades por parte de los agentes y (b) la formulación del problema matemático que permitiese transformar los criterios subjetivos en un esquema de ponderación adecuado a cada caso particular.

- ***Objetivo 2: Validación y testeo de la metodología de evaluación en casos de estudio donde se hayan llevado a cabo rehabilitaciones energéticas.***

Como segundo objetivo, se planteó la validación de la metodología propuesta en casos de estudio donde se hubiese implementado un proyecto de rehabilitación

energética. Esto permitía validar la adecuación de la metodología propuesta y la proximidad al problema real.

Así, las dos versiones de la metodología, con sus esquemas estático y dinámico de ponderación, se han validado en un conjunto de edificios del conjunto residencial de Cuatro de Marzo en Valladolid donde se llevaron a cabo actuaciones de mejora de los edificios tanto en sus elementos pasivos como en los sistemas activos de energía, además de la integración de fuentes de energía renovable.

La implementación de la metodología en este proyecto ha permitido observar cómo el sistema de evaluación es capaz de recoger las condiciones de contorno y adecuar el proyecto a una serie de prioridades ofreciendo así el conjunto de medidas que más se adecúa a los objetivos perseguidos.

- ***Objetivo 3: Integración de la metodología de evaluación junto con un sistema automático de generación de escenarios de rehabilitación energética basado en un catálogo de tecnologías de rehabilitación en los ámbitos de sistemas pasivos, activos, sistemas de energías renovables y estrategias de control.***

Finalmente, como tercer objetivo, se planteó la integración de la metodología dentro de una herramienta que permitiese automatizar ciertos elementos del proceso de diseño del proyecto de rehabilitación junto con otros aspectos como la implementación de un sistema colaborativo, la integración de un marco de interoperabilidad entre herramientas o la automatización de la definición de los escenarios candidatos de rehabilitación.

La evolución de la metodología planteada siempre ha buscado este fin y su diseño y validaciones se han llevado a cabo bajo esta premisa. La herramienta global integra otros muchos elementos que no son objeto de la presente tesis doctoral, pero que han sido esenciales para poder llevar a cabo los objetivos establecidos.

Así, además de la generación automática de escenarios de rehabilitación, en base al catálogo de medidas, o la integración de herramientas de cálculo para establecer el valor de los indicadores para cada escenario (actual o candidato), un elemento clave ha sido el desarrollo del evaluador que ha permitido integrar los procesos de transformación de los criterios de los agentes en los esquemas de priorización que persiguen optimizar los escenarios.

Estos desarrollos han permitido validar el sistema de evaluación de nuevo en el caso del área del Cuatro de Marzo en Valladolid, pero en este caso con la posibilidad de generar un número de escenarios mucho mayor y de poder proponer diferentes escenarios de priorización al eliminar la necesidad de realizar los modelos y los cálculos de manera manual, lo que permitió reducir drásticamente los tiempos necesarios.

## 7.2 Conclusiones en relación a la metodología

El desarrollo de la investigación de la presente tesis doctoral se ha llevado a cabo a través del procedimiento metodológico descrito en la sección 2.4 (Metodología). Este procedimiento establecía la identificación de la hipótesis y la implementación de 7 pasos para el desarrollo de la investigación, resultando los tres últimos en los artículos que conforman el núcleo de la tesis. Las principales conclusiones respecto a las actividades llevadas a cabo a través de esta metodología son las siguientes:

- ***Investigación sobre el proceso de rehabilitación energética: necesidad de mejora de la interacción entre agentes y de los sistemas de toma de decisiones***

Como se menciona anteriormente, y tal y como se describe al comienzo de esta tesis, el proceso de rehabilitación energética se enfrenta a numerosas barreras en los ámbitos técnico, económico, social o regulatorio. Sin embargo, no son estas las únicas barreras que aparecen, sino que surgen otras propias del proceso de diseño del proyecto de rehabilitación.

Estas barreras de proceso responden a cuestiones relacionadas con los agentes involucrados en la rehabilitación energética así como con la colaboración entre los mismos que se ve dificultada por los intereses específicos de cada uno; en ocasiones contrapuestos.

Además, la consideración de las condiciones de contorno no siempre se realiza de manera global al inicio del proceso de la rehabilitación, que debe comenzar con un diagnóstico de las condiciones actuales. Esto hace que, en ocasiones, aparezcan nuevos elementos durante el proceso que provoquen cambios que impactan enormemente en los tiempos o los costes de la rehabilitación.

Todo esto resulta en que la rehabilitación energética carece de la credibilidad necesaria para poder dinamizar las inversiones necesarias que permitan alcanzar los objetivos de descarbonización.

Así, se ha observado la necesidad de mejorar los procedimientos para que la toma de decisiones se lleve a cabo de una manera más consensuada y que permita la integración de los intereses de todos los agentes y, además, la de todos los condicionantes que afectan al proyecto de rehabilitación.

- ***Generación de una metodología integral que mejore el proceso: integración de procesos y herramientas colaborativas y técnicas de decisión multicriterio***

Como resultado de lo anterior, se llevó a cabo el diseño de una metodología integral, analizando los pasos del proceso de rehabilitación e identificando los puntos de mejora a través de la implementación de diferentes estrategias.

Así, la metodología de rehabilitación propuesta se basa en 4 pasos (diagnóstico, diseño, implementación y evaluación) para los cuales se han establecido una serie de criterios que permiten mejorar su implementación e integrando cuatro ejes horizontales: la mejora de la colaboración entre agentes, la integración de un sistema de evaluación basado en indicadores de distrito, la implementación de una serie de herramientas de soporte, y la colaboración a través de un sistema basado en BIM.

Aunque no todos estos aspectos son objeto de la investigación que se presenta en esta tesis doctoral, es necesario analizarlos en conjunto para una mejor comprensión de los aspectos que sí se han abordado.

La metodología diseñada permite, por un lado, mejorar la manera en que los agentes se comunican y gestionan su colaboración a través de metodologías basadas en el IPD o de la integración de modelos BIM, que permiten centralizar la información y hacerla accesible a los agentes involucrados.

Y, por otro lado, establece un sistema de evaluación basado en indicadores y las herramientas necesarias para su cálculo para garantizar que las decisiones se toman en base a la información más relevante de acuerdo al caso.

Esta metodología se diseñó para dar respuesta a estas cuestiones y, en un primer paso, estableciendo procedimientos manuales para cada proceso, lo que derivaba en una gran necesidad de tiempo y de generación de modelos para poder llevar a cabo los pasos establecidos.

En la evolución de los trabajos de la presente investigación, y como se indica en numerosas ocasiones, en base a los proyectos en el marco de los cuales se ha

implementado, esta metodología se transformó en una herramienta que permitió automatizar la generación de escenarios, el cálculo de los indicadores, así como los flujos de información necesarios para la alimentación de cada uno de los modelos.

El reto de automatizar estos procesos ha sido considerable, ya que, por ejemplo, la formulación de escenarios debe responder a un gran número de consideraciones (geometrías, análisis de elementos existentes, cuestiones técnicas o legales, etc.) Por otro lado, la generación de los modelos requiere la implementación de un marco de interoperabilidad que permita trasladar la información de unos modelos a otros, eliminando la necesidad de generar nuevos de manera manual.

Sin embargo, la viabilidad del sistema de evaluación propuesto, integrando la escala de distrito y un completo sistema de indicadores y su priorización, es únicamente posible con la existencia de estos procesos automáticos ya que, de otra manera, el conocimiento y el tiempo necesario para la generación de escenarios así como para la generación de cada modelo de simulación hace inviable esta aproximación.

- ***Identificación de técnicas de soporte a la toma de decisiones: potencial de integración de técnicas multi-criterio y su adecuación al proceso de toma de decisiones sobre el proyecto de rehabilitación energética***

En línea con lo anterior, se planteó como estrategia la integración de técnicas de decisión multicriterio para poder incorporar la información relevante acerca de la caracterización de los diferentes escenarios (existente y candidatos de rehabilitación) a través de un sistema de indicadores, así como la integración de los criterios de priorización de los agentes mediante un sistema de ponderación.

La integración de estas técnicas ha resultado satisfactoria de cara a reflejar los elementos más relevantes a considerar en el proceso del diseño de proyecto de rehabilitación tanto a través de los indicadores como a través del sistema de priorización de los mismos.

- ***Selección de indicadores: establecimiento de un sistema de indicadores relevantes, unívocos y que garanticen la accesibilidad al procedimiento de cálculo***

El sistema de indicadores seleccionados para diseñar e implementar el sistema de evaluación se basa en un análisis de sistemas de indicadores existentes de proyectos

previos o estándares, buscando su relevancia, idoneidad para evaluar cada uno de los escenarios propuestos así como la accesibilidad al procedimiento de cálculo a través de las herramientas existentes.

El marco propuesto ha demostrado permitir cuantificar, evaluar y seleccionar los escenarios que mejor se adecúan a los criterios establecidos y a las condiciones de contorno del proyecto.

### 7.3 Conclusiones en relación a los resultados

Las conclusiones obtenidas en relación a los resultados se detallan en los tres artículos que componen el núcleo de la tesis doctoral. En líneas generales, estas conclusiones son las siguientes:

- ***La metodología propuesta para el proceso de rehabilitación energética mejora la cadena de valor.***

Tal y como se ha demostrado a través de las validaciones llevadas a cabo, la metodología que se ha desarrollado permite integrar los criterios de priorización de los agentes así como mejorar la información para poder cuantificar la mejora sobre los escenarios propuestos para la rehabilitación. Así, la toma de decisiones es más informada y pone en valor los intereses de los diferentes agentes.

- ***La metodología propuesta para el proceso de rehabilitación energética contribuye a maximizar los beneficios para los agentes.***

Los agentes involucrados en el proceso ven reflejados sus intereses y esto contribuye a maximizar los beneficios para cada uno de ellos. La metodología que se ha propuesto y desarrollado permite considerar un gran número de alternativas de diseño y cuantificarlas para poder identificar las que mejor se adecúan a las condiciones del proyecto y a los criterios de los agentes. Además, el proceso planteado permite reducir incertidumbres y anticipar y resolver posibles problemas en las fases posteriores a la de diseño a través no solo de los planteamientos de esta investigación, sino también mediante la integración de otros elementos como basar la metodología en una aproximación BIM.

Así, los tiempos necesarios para la evaluación, la posibilidad de considerar un número mayor de escenarios y la integración de los criterios de priorización para

reflejar los intereses de los agentes redundan en la maximización de los beneficios para los mismos.

- ***La metodología propuesta para el proceso de rehabilitación logra evaluar la complejidad de un distrito, favoreciendo el aprovechamiento de la escala.***

El enfoque de la metodología se basa en la consideración de la escala de distrito y de la maximización de las ventajas derivadas de ello. La posibilidad de considerar los edificios como parte de un sistema más amplio permite integrar soluciones que, de otra manera, no serían posibles. La complejidad del entorno construido hace que ciertas tecnologías no sean viables en unos edificios pero en otros sí. Además, las economías de escala permiten reducir costes y reducir así los retornos de la inversión.

El sistema de evaluación empleado se basa en la consideración del distrito como unidad energética y, como tal, busca la optimización de los indicadores para el conjunto de los edificios y no para los mismos de manera individual.

- ***La metodología propuesta para el proceso de rehabilitación permite incrementar la confianza y así fomentar las inversiones.***

La integración del sistema de evaluación y de las herramientas necesarias para el cálculo de los indicadores contribuye a incrementar el nivel de la información evaluada mientras que reduce la incertidumbre inducida por la generación manual de diferentes modelos de simulación. Además, la consideración de un mayor número de alternativas para la toma de decisiones garantiza que puedan alcanzarse escenarios que en otros casos quedarían fuera al considerar un espectro mayor de escenarios candidatos para la rehabilitación.

Esto, junto con la reducción de tiempos no solo en la toma de decisiones gracias a la metodología sino también acompañado de otros elementos durante las fases siguientes al diseño, hace que se reduzcan también los costes y así se fomenten las inversiones.

- ***El uso de herramientas colaborativas favorece el proceso, reduciendo tiempos y costes.***

Como se indica en el punto anterior, además hay otros elementos que considera la metodología propuesta, que permiten reducir tiempos y costes. Estos son

la integración de herramientas que fomentan la colaboración y los procesos colaborativos como las aproximaciones basadas en BIM e IPD respectivamente.

La metodología diseñada se basa en estos principios y se integra en una herramienta que basa su funcionamiento en un enfoque IPD para la colaboración entre los agentes y en BIM para la inserción de la información que, posteriormente, se transformará en los modelos de simulación que permitan calcular los indicadores.

Se ha demostrado ampliamente que esto contribuye a la reducción de los tiempos y, en consecuencia, de los costes asociados al proceso.

- ***La aplicación de técnicas de evaluación multicriterio es ciertamente factible y contribuye a la toma de decisiones más informada y consensuada.***

Como se ha demostrado a lo largo de la tesis y de los artículos publicados, la integración de técnicas de evaluación multicriterio para la formulación del problema de la toma de decisiones sobre la rehabilitación energética es factible y mejora el proceso considerablemente.

Así, de las diferentes técnicas empleadas, el esquema basado en la comparación por pares que permite generar un esquema de priorización único para cada caso ha demostrado que los escenarios planteados responden a los intereses reflejados por los agentes y, de esta manera, incrementan el consenso en la toma de decisiones.

Asimismo, esta toma de decisiones se basa en una mayor cantidad de información que en el proceso tradicional, donde generalmente el número de indicadores evaluados o de alternativas de diseño es mucho más reducido debido a los tiempos y conocimientos necesarios para ello.

- ***La optimización de los escenarios de rehabilitación tienen una alta dependencia en la calidad de información introducida.***

Un elemento clave en todo el proceso es la calidad de la información introducida que debe responder a una serie de estándares para garantizar a su vez la calidad de los resultados. La metodología propuesta así como la herramienta desarrollada en base a la misma tienen un gran grado de sensibilidad con referencia a la información que introduce el usuario mientras que en un proceso manual la sustitución de falta de información o de información incorrecta por valores por defecto puede quizás reducir el impacto sobre los resultados.



- ***La integración de las condiciones de contorno en la definición del problema es clave para lograr una evaluación adecuada de los escenarios de mejora.***

La formulación y evaluación de los escenarios de intervención debe integrar toda la información posible sobre las condiciones de contorno desde las fases iniciales del proceso de diseño de la rehabilitación. Así, es fundamental que el diagnóstico recoja la información relevante acerca de estos condicionantes que pueden afectar a la selección de tecnologías o a la evaluación de los escenarios. La metodología propuesta basa la formulación de los escenarios en esta información y así garantiza que los escenarios propuestos y evaluados responden a las particularidades de cada caso.

## 8 Conclusions

Energy retrofitting of buildings has been identified as one of the key strategies in the transition towards a decarbonised economy, contributing to improving the quality of our cities as well as their resiliency. The energy retrofitting project is still highly conditioned by important barriers that difficult the scaling-up and replication of projects that allow improving buildings both from the energy perspective as well as from the comfort conditions point of view. These barriers mainly respond to technical, economic or legal aspects. But, also, there are other aspects inherent to the process that provoke that the interests from stakeholders, the scarce communication and collaboration among them or the use of tools with a really low level of integration and interoperability, result into projects that not always achieve the expected objectives, increasing costs or achieving lower rates of energy performance than expected. Thus, energy retrofitting is perceived by the users as something that “will go wrong” by default, with delays, extra costs, or with lower energy reductions than expected. Therefore, an effect of uncertainty is generated, which make stakeholders reluctant to invest on these projects.

Two elements have been identified as potential contributors to mitigate some of these barriers: the issue of scale and the improvement of the process through the interaction among stakeholders. These two aspects should necessarily be combined with a continuous improvement of the remaining elements as the update of the regulatory framework or economic questions as taxation in order to adapt them to the reality of the sector. However, these aspects are not tackled within this doctoral thesis.

Thus, this research work has been working in the development of a methodology that allows the integration of the issue of scale to maximise the technical and economic benefits, while generating a system that can facilitate the interaction among the stakeholders involved in the process through methods that foster the consensual decision making.

Following the main conclusions obtained through the development of this research are included, which may be divided into those related to the fulfilment of the objectives, to the methodology, and to the results achieved.

## 8.1 Conclusions in relation to the fulfilment of the objectives

This doctoral thesis has been designed around three main objectives followed by specific sub-objectives as described in section 2.2 (Objetivos). Below, the main conclusions referred to these objectives are provided:

- ***Objective 1: Development of a methodology to evaluate district energy retrofitting candidate scenarios through the calculation of indicators and the deployment of a dynamic weighting system based on collaborative strategies.***

This research has led to the design of a methodology that allows integrating elements to implement automatic procedures for processes as the evaluation and comparison of design alternatives for districts retrofitting. This methodology is based on the integration of a system of indicators, generated through the evaluation of existing schemes of indicators in the field, and as basis of a multi-criteria analysis and evaluation procedure where different approaches for establishing weights to the indicators have been investigated. Thus, in a first version of the methodology a static system of weights was proposed based on an experts' panel and the implementation of fuzzy logic techniques. This first approach served as basis to evaluate the suitability of implementing weighting procedures to the evaluation and selection of optimised scenarios for energy retrofitting as a decision-making support mechanism.

This methodology was improved in different steps through integration of multi-criteria decision making techniques to transform the static scheme into a dynamic one through two main procedures: (a) the simplification of the establishment of priorities by the stakeholders, and (b) formulating the mathematical problem that allows transforming the subjective criteria into a weighting scheme adapted to each particular project.

- ***Objective 2: Validation and testing of the evaluation methodology in case studies where energy retrofitting projects have already been carried out.***

As a second objective, this proposed methodology has been validated in case studies that have undergone energy retrofitting projects to both evaluate the suitability of the methodology proposed and ensure the response to the real problem.

In this sense, the two versions of the methodology, with their static and dynamic schemes, have been validated in a group of buildings in the district of Cuatro

de Marzo, in Valladolid, where an energy retrofitting intervention was carried out between 2014 and 2016 integrating measures related to the passive and active energy systems, as well as renewable energy sources.

The implementation of the methodology in this project has allowed observing how the evaluation system is able to collect the boundary conditions and adapt the project to the priorities established by the stakeholders offering thus a set of energy conservation measures that are considered optimal for the expected outcomes.

- ***Objective 3: Integration of the evaluation methodology into a system of automatic generation of candidate retrofitting scenarios based on a catalogue of energy retrofitting technologies in the fields of passive, active, renewable energy sources and control technologies.***

Finally, and as third objective, this research has worked on the integration of the methodology within a tool that allows implementing automatic procedures within the process of designing energy retrofitting projects. These automated processes have been the implementation of a collaborative system, the integration of an interoperability framework among different tools or the automation of the identification of candidate retrofitting scenarios.

The evolution of the methodology proposed has been aimed at this final objective and its design and validation has been carried out under this premise. The global tool integrates additional elements which are not subject of this doctoral thesis but that are essential for the achievement of these objectives and, therefore, to understand them.

Thus, beyond the automatic formulation of energy retrofitting alternatives based on the catalogue of energy conservation measures or the integration of calculation tools for the indicators (both for the baseline of the candidate retrofitting scenarios), the development of the evaluator has been a key element. This component has allowed integrating the processes to transform the stakeholders' criteria into the prioritisation schemes that are aimed at optimising the scenarios.

These developments have allowed validating the evaluation system in the reference case study that has been used for the whole research: the Cuatro de Marzo district in Valladolid. However, in this case, the possibility to generate a greater number of candidate retrofitting alternatives and to propose different prioritisation

schemes has allowed a more detailed evaluation of the methods proposed. This has been possible through the reduction of the time required to both formulate the scenarios and to generate the alternative simulation models to calculate the indicators.

## 8.2 Conclusions in relation to the methodology

The development of the research activities that have resulted into this doctoral thesis have been carried out through the methodological approach described in section 2.4 (Metodología). This methodology established the identification of the hypothesis and the implementation of 7 research steps for the development of the investigation, where the three lasts have resulted into the journal papers that form the core of this thesis. The main conclusions referred to the activities carried out through this methodology are the following:

- ***Research about the energy retrofitting process: need to improve the stakeholders' interaction among them and with the decision making systems***

As previously mentioned, and as described at the beginning of this doctoral thesis, the energy retrofitting process faces several barriers in the technical, economic, legal or regulatory fields. However, these are not the only barriers encountered when addressing energy retrofitting projects as there are also some specific barriers related to the design process.

These process barriers are referred to aspects related to the stakeholders involved in the energy retrofitting as well as in the collaboration among them, which is hampered by their specific interests which are sometimes opposite.

Moreover, the considerations about the boundary conditions are not always addressed from a global perspective when the retrofitting process starts, when the stakeholders deal with the diagnosis step. This provokes that, sometimes, new elements appear in subsequent stages and therefore cause changes that impact the timing and costs of the project.

All these elements result into a lack of trust into the energy retrofitting project which is necessary in order to foster the required investments to achieve the expected objectives in terms of decarbonisation of the building stock.

Thus, it has been observed a strong need to improve the procedures in order to ensure a more informed and consensual decision making that allows integrating the

priorities of all the stakeholders and, furthermore, the consistent consideration of all the conditioning aspects that influence the retrofitting project.

- ***Development of a holistic methodology that improves the process: integration of collaborative processes and tools, and decision making techniques***

As a result from the previous, this research work addressed the design of a holistic methodology based on an analysis of the retrofitting process and the identification of its main weaknesses as well as the improvement potential.

Thus, the methodology proposed is based on 4 steps (diagnosis, design, implementation and evaluation) for which a set of criteria to improve its implementation have been proposed. Also, the methodology integrates 4 horizontal elements: the improvement of the collaboration among stakeholders, the integration of an evaluation system based on district indicators, the implementation of support tools, and the collaboration through a BIM-based environment.

Although not all these elements are subject of this doctoral thesis, they are required for its understanding and should be therefore considered globally.

The methodology proposed allows, on the one hand, improving the way in which stakeholders communicate and manage their collaboration through methods based on IPD approaches or the integration of BIM models. These contribute to centralising the information and making it available for the involved stakeholders.

On the other hand, the methodology establishes an evaluation system which is based on indicators and the tools required for their calculation in order to guarantee that decisions made are implemented based on the greatest amount of information according to the specific case.

This methodology was designed to give an answer to these elements and, in a first step, establishing the manual procedures for these processes, which derived into a considerably demanding process in terms of time and knowledge as it proposes the generation of multiple models for each candidate scenario.

Through the evolution of the works carried out as part of these research activities, this methodology was transformed into a tool that allowed automating the generation of scenarios, the calculation of indicators, as well as the information flows required to feed the models.

The automation of these processes has supposed considerable challenge as, for example, it required that the formulation of scenarios responds to a great number of considerations (geometry, analysis of existing elements, technical or legal aspects, etc.) Also, the generation of the models requires the implementation of an interoperability framework that allows translating the information from one model to another, eliminating the need to generate manually these models.

However, the evaluation system proposed, integrating the district scale and the system of indicators and prioritisation mechanisms, is only feasible with the existence of these automated processes as, otherwise, the knowledge and time required makes it non-viable.

- ***Identification of decision making support techniques: potential of integration of multi-criteria decision making and their suitability to the decision making process for the energy retrofitting project***

In line with the above, the integration of multi-criteria decision making techniques was proposed in order to allow incorporating the relevant information about the characterisation of the scenarios through an indicators' scheme as well as the integration of the priorities of the stakeholders through an aggregation system.

The integration of these techniques has resulted satisfactory to reflect the main elements to be considered in the design process of a retrofitting project both through the system of indicators and also with the implementation of the prioritisation methods.

- ***Selection of indicators: establishment of an indicators' framework that are relevant, unambiguous and that guarantee the accessibility to the calculation process***

The scheme of indicators selected to design and implement the evaluation system is based on an analysis of existing schemes of indicators in previous projects or existing standards. The main objective to select these indicators has been to ensure their relevance, their suitability to evaluate and optimise the candidate retrofitting alternatives as well as the accessibility to the calculation procedure through existing simulation tools.

The framework proposed has allowed the quantification, evaluation and selection of scenarios that better suit the requirements established and the boundary conditions of the project.

### 8.3 Conclusions in relation to the results

The conclusions referred to the results of the research are provided within the three journal papers that form the core of this doctoral thesis. In summary, these conclusions are the following:

- ***The methodology proposed for the energy retrofitting process improves the value chain.***

As it has been demonstrated through the validations that have been carried out, the methodology that has been developed allows the integration of the prioritisation criteria given by the stakeholders while improving the information that supports the quantification of the improvements within each proposed scenario. Thus, the decision making process is more informed and maximises the value of the interests of the stakeholders involved.

- ***The methodology proposed for the energy retrofitting process contributes to maximising the benefits to the stakeholders.***

The stakeholders involved in the process see their interests reflected into the process and this contributes to the maximisation of the benefits for them. The methodology proposed and developed allows considering a huge number of candidate retrofitting alternatives and their quantification in order to identify those that better suit the project conditions and the stakeholders' criteria. Moreover, the process that has been proposed allows the reduction of uncertainties and anticipating and resolving potential problems in the subsequent stages after the design has been completed. This is possible not only due to the aspects tackled within this doctoral thesis but also with their integration with other elements and the BIM approach in which the methodology is based.

Thus, the time required for the evaluation, the possibility to consider a greater number of scenarios, and the integration of the stakeholders' prioritisation criteria to reflect their interests, result into the maximisation of the benefits.



- ***The methodology proposed for the energy retrofitting process allows evaluating the complexity of a district, fostering the scale advantage.***

The approach for the energy retrofitting methodology proposed is based on considering the district as a unique energy unit and the maximisation of the advantages that this can bring to the retrofitting problem. The possibility to consider buildings as part of a greater system allows proposing technologies that otherwise would not be feasible. The complexity of the built environment provokes that certain technologies cannot be implemented in some of the buildings, while they are implementable in others or in the surroundings. Therefore, the district energy performance can be balanced exploiting these synergies. Moreover, the economies of scale allow reducing costs and therefore the payback periods.

The evaluation system proposed is based on considering the district as an unit and, as such, the optimisation of the indicators is sought for the group of buildings and not for them in an isolated manner.

- ***The methodology proposed for the energy retrofitting process allows increasing confidence in the results and thus foster the investments.***

The integration of the evaluation system and the tools required for the calculation of the indicators contributes to increasing the degree of the information evaluated while reduces the uncertainty derived from the manual generation of multiple simulation models. Furthermore, considering a greater number of alternatives for the decision making guarantees that some scenarios are reached which otherwise would not be considered as in the business as usual only a considerably reduced range of candidate retrofitting scenarios can be considered.

This fact, along with the reduction of time not only in the decision making stage but also in the subsequent stages (construction works, commissioning, etc.) results into the reduction of costs and, therefore, into fostering new investments.

- ***The use of collaborative tools improves the process, reducing time and costs.***

As indicated in the previous point, there are also other elements that are considered by the methodology proposed that allow reducing time and costs. These are, for example, the integration of tools that foster the collaboration and the

implementation of collaborative processes as the approaches based on BIM and IPD respectively.

The methodology designed is based on these principles and is integrated into a tool that follows the IPD approach for the collaboration among stakeholders and in BIM for the data insertion. This data will later be transformed into the simulation models required for the calculation of the indicators.

Thus, it has been thoroughly demonstrated that this contributes to time reduction and, as consequence, the reduction of costs associated to the process.

- ***The implementation of multi-criteria decision making techniques to the energy retrofitting problem is feasible and contributes to a more informed and consensual decision making.***

As demonstrated throughout this doctoral thesis and the papers published, the integration of multi-criteria decision making techniques for the formulation of the retrofitting problem is feasible and improves the process considerably.

Thus, from the different technical approaches implemented, the scheme based on the pairwise comparison to generate a specific prioritisation scheme for each project has demonstrated that the scenarios proposed by the tool respond to the interests indicated by the stakeholders and, in this sense, increase the consensus in the decision making process.

Likewise, this decision making process is based on a greater amount of information than in the business as usual, where generally the number of indicators evaluated or the design alternatives considered is considerable lower due to the time and knowledge required for considering a greater number.

- ***The optimisation of energy retrofitting scenarios is highly dependent on the quality of the information provided.***

The quality of the information introduced is a key element in the whole process and must respond to a set of conditions to guarantee the quality of the results. The methodology proposed as well as the tool developed to integrate it present a high degree of sensibility referred to the information that the user inserts. In a manual process, however, information gaps or incorrect values can more easily be identified with default values that can, in some cases, mitigate the impact on the results.

- ***The integration of the boundary conditions in the problem definition is a key element to achieve an appropriate evaluation of the retrofitting scenarios.***

The formulation and evaluation of the candidate retrofitting scenarios must integrate all the possible information about the boundary conditions from the early stages of the retrofitting design process. Thus, it is essential that the diagnosis collects all relevant information about all these conditioning factors that can affect the selection of technologies or the evaluation of scenarios. The methodology proposed realises the formulation of scenarios based on this information and, thus, guarantees that the candidate retrofitting alternatives are in line with the concrete conditions of each specific project.

**LÍNEAS FUTURAS DE  
INVESTIGACIÓN**  
*FUTURE RESEARCH LINES*



## 9 Líneas futuras de investigación

En base a las conclusiones expuestas en el capítulo anterior se plantean las siguientes líneas futuras de investigación:

- La metodología propuesta y la herramienta generada permiten integrar nuevos indicadores que permitan evaluar otras cuestiones como las relacionadas con la sostenibilidad de los materiales o la gestión del agua. Así, como línea futura se plantea el trabajo sobre la extensión del sistema de indicadores y la integración de nuevas herramientas que permitan calcularlos.
- Igualmente, el número de tecnologías consideradas como parte del catálogo para la generación de escenarios es limitado así que el trabajo futuro pasa necesariamente por integrar nuevas soluciones tecnológicas que, en algunos casos, harán necesario modificar el sistema de indicadores.
- La consideración sobre las condiciones de confort es quizás algo limitada dada la dificultad de la evaluación de parámetros que vayan más allá de la identificación de temperaturas fuera de rango. Algunos de estos indicadores se plantearon en la metodología inicial pero, posteriormente, tuvieron que ser simplificados debido a la dificultad de la generación de modelos que permitan evaluarlos con cierto nivel de validez. Así, parte del trabajo futuro podría centrarse en la mejora de la evaluación de los parámetros de confort.
- Por otro lado, la metodología tiene la capacidad de adaptarse para dar respuesta a la validación del cumplimiento de objetivos para los parámetros que se evalúan. De esta manera, podría integrarse con alguna certificación o integrar los objetivos nacionales de reducción de consumo energético o emisiones.



## 10 Future research lines

Based on the conclusions in the previous chapter, the following future research lines can be established:

- The methodology proposed and the tool developed allows the integration of new indicators to evaluate other relevant fields as those related with sustainability of materials or water management. Thus, future research work should investigate on how the system of indicators can be extended and how new tools can be integrated in order to calculate them.
- Similarly, the number of technologies considered within the ECMs catalogue for the generation of candidate retrofitting scenarios is limited, so future work should address the integration of new technology solutions that may require an adaptation of the system of indicators.
- The considerations about comfort conditions are quite limited given the difficulties appearing when evaluating parameters that go beyond the identification of temperature outside range. Some of these indicators were identified to be included as part of the evaluation system but then the system was simplified given the complexity associated to the generation of models that provide consistent values. Therefore, a potential future research line could consider the integration of advanced models to simulate the comfort conditions in order to enrich the evaluation system.
- Finally, the methodology presented can be adapted to show the level of fulfilment of the objectives for the parameters evaluated. In this sense, the tool could integrate a certification scheme or the national requirements in terms of energy or emissions reduction.





# BIBLIOGRAFÍA



# 11 Bibliografía

## 11.1 Introducción

- [01] Pérez, S. (2018), 1<sup>st</sup> of August 2018, Earth Overshoot Day, Editorial, UNIO EU Law Journal.
- [02] United Nations General Assembly (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015.
- [03] Hancher, L, Winters, B.M. (2017). The EU Winter Package. Briefing paper.
- [04] United Nations. Framework Convention on Climate Change (2016). Decision 1/CP.21. Adoption of the Paris Agreement.
- [05] European Commission. COM(2015) 080 final. A framework strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy.
- [06] European Commission. COM(2016) 860 final. Clean Energy for All Europeans.
- [07] European Commission. COM(2018) 773 final. A Clean Planet for All. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy.
- [08] European Commission. COM(2019) 640 final. The European Green Deal.
- [09] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Borrador actualizado del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (20 de enero de 2020).
- [10] <http://www.minetad.gob.es/es-ES/GabinetePrensa/NotasPrensa/2018/Documents/Resumen%2020180402%20Veditado.pdf>
- [11] Ministerio de Fomento. Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo.
- [12] Ministerio de la Presidencia y para las Administraciones Territoriales. Real Decreto 564/2017, de 2 de junio, por el que se modifica 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.

- [13] Hermelink, A., Chimschar, S., Offermann, M., John, A., Reiser, M., Pohl, A., Grözinger, J. (2019). Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU. Prepared for the European Commission.
- [14] Casanovas, X., Cuchí, A., Mas Herrero, J., Rubio del Val, J. (2018). Por un cambio en las políticas públicas de fomento de la rehabilitación residencial: los municipios, pieza clave en un marco de cooperación institucional. Iniciativa del Grupo de Trabajo sobre Rehabilitación (GTR) coordinado por GBCe y CONAMA.
- [15] OptEEmAL consortium (2019). OptEEmAL: the solution for designing your energy efficient district retrofitting project. Final Booklet. Available at: [https://www.opteemal-project.eu/files/opteemal\\_final\\_booklet\\_web.pdf](https://www.opteemal-project.eu/files/opteemal_final_booklet_web.pdf)

## 11.2 Investigación. Objetivos, metodología e hipótesis

- [16] Rubio del Val, J. (2011) “Urban rehabilitation in Spain (1989-2010). Present challenges and recommendations to overcome them”, Informes de la Construcción Vol. 63, EXTRA,5-20
- [17] Rubio del Val, J. 2011 “Urban rehabilitation in Spain (1989-2010).Present challenges and recommendations to overcome them”.
- [18] Ebert, U. and Welsch, H. (2004) Meaningful environmental indices: a social choice approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, 47, 270-283.
- [19] Valderrama-Ulloa, C., Puigalli, J.R. (2014) User requirements in building translated in a methodology of decision support. *Informes de la Construcción*, 66, 534, e022.
- [20] Z. W. Geem, J. Hoon Kim and G. V. Loganathan, A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, *Simulation*, vol. 76, no. 2, pp. 60--68, (2001).
- [21] Font Arellano, A., 1976, Valladolid. Procesos y formas del crecimiento urbano, Delegación de Valladolid del COAM, Madrid.
- [22] Meiss, A., Del Caz, R. & Álvaro, A., 2013, Rehabilitación de barrios de vivienda social. El ARI de la Rondilla en Valladolid. *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales CyTET XLV (175) 2013*. Ministerio de Fomento, Madrid.
- [23] Gigosos, P. & Saravia, M., 1997, *Arquitectura y urbanismo de Valladolid en el siglo XX*, Serie: Historia de Valladolid, VIII-2, Ateneo de Valladolid, Valladolid.
- [24] Fernández, J. A., 1991, *Promoción oficial de viviendas y crecimiento urbano en Valladolid*, Universidad de Valladolid, Valladolid.
- [25] Barrio 4 de Marzo. *ArquitecturaVA: Mapa ampliado de Arquitectura Moderna de Valladolid*. Accesible en: <https://arquitecturava.es/proyectos-valladolid/barrio-cuatro-de-marzo/>

### 11.3 Estado del arte

- [26] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
- [27] García-Fuentes, M. et al. OptEEmAL Proposal for the topic EeB-05-2015.
- [28] AA.VV. Integrated Project Delivery: A Guide. American Institute of Architects, AIA California Council, 2014.
- [29] Larsson, N. (2009). The Integrated Design Process. History and Analysis. International Initiative for a Sustainable Built Environment.
- [30] Mota et al. (2009) citado en: Araújo, C.: Sustainable Construction Key Indicators. University of Minho.
- [31] Sauer B. et Pedrola B. (2014), First survey of existing tools and methods supporting evaluation indicators for urban district retrofitting and renewal, ECODISTR-ICT project, <http://ecodistr-ict.eu/>
- [32] García-Fuentes, M. et al. OptEEmAL Proposal for the topic EeB-05-2015.
- [33] Rowley, H.V. (2012). Aggregating sustainability indicators: beyond the weighted sum. *Journal of Environmental Management*, 111, 24-33.
- [34] Boyssoy, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukiàs, A., Vincke, P. (2006). Evaluation and decision models with multiple criteria: stepping stones for the analyst. Springer, New York.
- [35] The Delphi Method: Techniques and Applications; Linstone, H. A., Turoff, M., Eds.; Wesley Publishing Company: Boston, MA, USA, 2002; ISBN: 0-201-04294-0.
- [36] Chang, P.T.; Hung, L.T. Discussion on fuzzy decision making based on fuzzy number and compositional rule of inference. *Yugoslav J. Oper. Res.* 2015, 25, 271–282.
- [37] Van Leekwijck, W.; Kerre, E.E. Defuzzification: Criteria and classification. *Fuzzy Set Syst.* 1999, 108, 159–178.
- [38] Song, B.; Kang, S. A Method of Assigning Weights Using a Ranking and Nonhierarchy Comparison. *Adv. Decis. Sci.* 2016, 2016, 1–9.
- [39] Saaty, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.* 2008, 1, 83.
- [40] Klutho, S. *Mathematical Decision Making: An Overview of the Analytic Hierarchy Process.* 2013.

## 11.4 Artículo 1: Metodología innovadora de soporte al diseño de proyectos de rehabilitación energética de barrios basada en un enfoque de análisis de decisiones multicriterio

- [41] European Commission. Final proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on energy efficiency and repealing Directives; COM(2011) 370; European Commission: Brussels, Belgium, 2011.
- [42] European Commission. Strategic Energy Technology (SET) Plan. Towards an Integrated Roadmap: Research and Innovation Challenges and Needs of the EU Energy System; COM(2013)253; European Commission: Brussels, Belgium, 2013.
- [43] Gee, L.; Dijol, J. Financing Nearly Zero Energy Housing Projects. Power House Nearly Zero Energy Challenge; NHF & CECODHAS Housing Europe: Brussels, Belgium, 2013.
- [44] Multi-Criteria Analysis: A Manual; Communities and Local Government Publications: Wetherby, UK, 2009.
- [45] Ma, Z.; Cooper, P.; Daly, D.; Ledo, L. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy Build.* **2012**, 55, 889–902.
- [46] Al Ahbabi, M. Process Protocol for the Implementation of Integrated Project Delivery in the UAE: A Client Perspective. Ph.D. Thesis, University of Salford, Salford, UK, 2014.
- [47] Kapogiannis, G.; Gaterell, M.; Oulasoglou, E. Identifying uncertainties toward sustainable projects. *Procedia Eng.* **2015**, 118, 1077–1085.
- [48] Bryde, D.; Broquetas, M.; Volm, J.M. The Project benefits of Building Information Modelling (BIM). *Int. J. Proj. Manag.* **2013**, 31, 971–980.
- [49] García-Fuentes, M.A., Pujols, C., García-Pajares, R., Vasallo, A., Martín, A. Metodología de Rehabilitación Energética hacia Distritos Residenciales de Energía Casi Nula. Aplicación al barrio del Cuatro de Marzo (Valladolid); II Congreso EECN: Madrid, Spain, 2013.
- [50] Efficient Valuation Organisation. International Performance Measurement and Verification Protocol: Core Concepts; Efficient Valuation Organisation: Washington, DC, USA, 2016.
- [51] R2CITIES Consortium partners. D4.1: Report of the M&V protocol analysis; R2CITIES Consortium partners: Boecillo, Spain, 2013.
- [52] Rowley, H.V.; Peters, G.M.; Lundie, S.; Moore, S.J. Aggregating sustainability indicators: Beyond the weighted sum. *J. Environ. Manag.* **2012**, 111, 24–33.
- [53] Roy, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*; Kluwer Academic Publishers: South Holland, The Netherlands, 1996.
- [54] Roy, B. Paradigms and Challenges. In *Multiple-Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*; Figueira, J., Greco, S, Ehrgott, M., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2005; pp. 3–24.

- [55] R2CITIES Consortium partners. D2.2: Report on High-Value Energy Products; R2CITIES Consortium partners: Boecillo, Spain, 2016.
- [56] Garrido, A.; Etminan, G.; Möller, S. Key Performance Indicator Guide; Smart Cities Information System: Brussels, Belgium, 2017.
- [57] Barba-Romero, S.; Pomerol, J.-C. Decisiones Multicriterio: Fundamentos teóricos y utilización práctica; Universidad de Alcalà: Madrid, Spain, 1995.
- [58] Ebert, U.; Welsch, H. Meaningful environmental indices: a social choice approach. *J. Environ. Econ. Manag.* **2004**, *47*, 270–283.
- [59] The Delphi Method: Techniques and Applications; Linstone, H. A., Turoff, M., Eds.; Wesley Publishing Company: Boston, MA, USA, 2002; ISBN: 0-201-04294-0.
- [60] Chang, P.T.; Hung, L.T. Discussion on fuzzy decision making based on fuzzy number and compositional rule of interference. *Yugoslav J. Oper. Res.* **2015**, *25*, 271–282.
- [61] Van Leekwijck, W.; Kerre, E.E. Defuzzification: Criteria and classification. *Fuzzy Set Syst.* **1999**, *108*, 159–178.
- [62] R2CITIES Consortium Partners. Available online: [http://r2cities.eu/demos/the\\_case\\_studies.kl](http://r2cities.eu/demos/the_case_studies.kl) (accessed on 06 September 2018)
- [63] Meiss, A.; Del Caz, R.; Álvaro, A.; Rehabilitación de barrios de vivienda social. El ARI de la Rondilla en Valladolid. In *Ciudad y Territorio: Estudios Territoriales*; Ministerio de Fomento; vol. 175 Madrid, Spain, 2013; p. 65-80.
- [64] García-Fuentes, M.A.; Pujols, C.; García-Pajares, R. Residential areas retrofitting towards nearly Zero Energy Districts (nZED). A case study: Valladolid-Cuatro de Marzo. In *Proceedings of the World Sustainable Buildings 2014 Conference*, Barcelona, Spain, 28–30 October 2014.
- [65] R2CITIES Consortium partners. D3.2: Optimum Integral Schematic Design; R2CITIES Consortium partners: Boecillo, Spain, 2016.
- [66] Crawley, D.; Lawrie, L.; Pedersen, C.; Winkelmann, F. EnergyPlus: Energy Simulation Program. *ASHRAE J.* **2000**, *42*, 49–56.

## **11.5 Artículo 2: Marco de evaluación como soporte a la optimización de escenarios de rehabilitación energética de edificios a escala de barrio**

- [67] Directive on the Energy Performance of Buildings (EPBD). Directive 2002/91/EC of the European Parliament and Council on Energy Efficiency of Buildings. *Off. J. Eur. Communities* **2002**, *1*, 65–71.
- [68] *Europe's Buildings under the Microscope*; Buildings Performance Institute Europe (BPIE): Bruxelles, Belgium, 2011; ISBN 9789491143014.



- [69] Laponche, B.; López, J.; Raoust, M.; Novel, A.; Devernois, N. *Energy Efficiency Retrofitting of Buildings: Challenges and Methods*; Agence Française de Développement: Paris, France, 2012.
- [70] Lilis, G.N.; Giannakis KKatsigarakis, K.; Rovas, D.; Costa, G.; Sicilia, A.; García-Fuentes, M. Simulation model generation combining IFC and CityGML data. In Proceedings of the ECCPPM 2016 11th European Conference on Product and Process Modelling, Limassol, Cyprus, 7–9 September 2016.
- [71] García-Fuentes, M.A.; Pujols, C.; García-Pajares, R.; Vasallo, A.; Martín, A. Metodología de Rehabilitación Energética hacia Distritos Residenciales de Energía Casi Nula. Aplicación al barrio del Cuatro de Marzo (Valladolid). In Proceedings of the II Congreso EECN, Madrid, Spain, 6–7 May 2014.
- [72] Bryde, D.; Broquetas, M.; Volm, J.M. The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *Int. J. Proj. Manag.* **2013**, *31*, 971–980.
- [73] AA.VV. *Integrated Project Delivery: A Guide*; Report; American Institute of Architects, AIA California Council: Sacramento, CA, USA, 2014.
- [74] Available online: [www.opteemal-project.eu](http://www.opteemal-project.eu) (accessed on 13 June 2019).
- [75] Lilis, G.N.; Giannakis, G.; Rovas, D.V. Inter-building shading calculations based on CityGML geometric data. In Proceedings of the 15th IBPSA Conference, San Francisco, CA, USA, 7–9 August 2017; pp. 370–379.
- [76] OptEEmAL Partners. D3.1: Requirements and Specification of the ECMs Catalogue. 2016. Available online: [https://www.opteemal-project.eu/files/opteemal\\_d3.1\\_requirementsandspecificationecmscatalogue.pdf](https://www.opteemal-project.eu/files/opteemal_d3.1_requirementsandspecificationecmscatalogue.pdf) (accessed on 9 May 2019).
- [77] Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the Construction and Facility Management Industries; ISO 16739; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2013.
- [78] Kolbe, T.H.; Gröger, G.; Plümer, L. CityGML: Interoperable Access to 3D City Models. In *Geo-Information for Disaster Management*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2005; pp. 883–899.
- [79] Lilis, G.N.; Giannalis, G.; Rovas, D. District-aware Building Energy Performance simulation model generation from GIS and BIM data. In Proceedings of the BSO 2018 4th Building Simulation and Optimisation Conference, Cambridge, UK, 11–12 September 2018.
- [80] Bazjanac, V. Space boundary requirements for modeling of building geometry for energy and other performance simulation. In Proceedings of the CIB W78, Cairo, Egypt, 16–19 November 2010.
- [81] Giannakis, G.; Lilis, G.N.; Garcia-Fuentes, M.A.; Kontes, G.; Valmaseda, C.; Rovas, D. A methodology to automatically generate geometry inputs for energy performance simulation from IFC BIM models. In Proceedings of the Building Simulation IBPSA Conference, Hyderabad, India, 7–9 December 2015; pp. 504–511.

- [82] Hernández, G.; Serna, V.; García-Fuentes, M.Á. Design of energy efficiency retrofitting projects for districts based on performance optimization of District Performance Indicators calculated through simulation models. *Energy Procedia* **2017**, *122*, 721–726.
- [83] García-Fuentes, M.Á.; García-Pajares, R.; Sanz, C.; Meiss, A. Novel Design Support Methodology Based on a Multi-Criteria Decision Analysis Approach for Energy Efficient District Retrofitting Projects. *Energies* **2018**, *11*, 2368.
- [84] Crawley, D.; Lawrie, L.; Pedersen, C.; Winkelmann, F. EnergyPlus: Energy Simulation Program. *ASHRAE J.* **2000**, *42*, 49–56.
- [85] De Tommasi, L.; Ridouane, H.; Giannakis, G.; Katsigarakis, K.; Lilis, G.N.; Rovas, D.; Tommasi, L. Model-Based Comparative Evaluation of Building and District Control-Oriented Energy Retrofit Scenarios. *Buildings* **2018**, *8*, 91.
- [86] Peyser, A.; Sinha, A.; Vennemo, S.B.; Ippen, T.; Jordan, J.; Graber, S.; Morrison, A.; Trench, G.; Fardet, T.; Mørk, H.; et al. NEST 2.14.0. *Zenodo* **2017**, doi:10.5281/zenodo.882971.
- [87] Valderrama-Ulloa, C.; Puiggali, J.R. User requirements in building translated in a methodology of decision support. *Informes de la Construcción* **2014**, *66*, e022.
- [88] AA.VV. *Multi-Criteria Analysis: A Manual*; Communities and Local Government Publications: Wetherby, UK, 2009.
- [89] *Environmental Management—Lifecycle Assessment: Principles and Framework*; ISO14040; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2006.
- [90] Pohekar, S.D.; Ramachandran, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2004**, *8*, 365–381.
- [91] Manjarres, D.; Mabe, L.; Oregi, X.; Landa-Torres, I.; Arrizabalaga, E. A Multi-objective Harmony Search Algorithm for Optimal Energy and Environmental Refurbishment at District Level Scale. In Proceedings of the 3rd International Conference on Harmony Search Algorithm (ICHSA 2017), Bilbao, Spain, 22–24 February 2017; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017.
- [92] Nemhauser, G.; Rinnooy, A.; Todd, M. (Eds.) *Optimization. Handbooks in Operations Research and Management Science*; Elsevier, Netherlands, 1989; Volume 1.
- [93] Rowley, H.V.; Peters, G.M.; Lundie, S.; Moore, S.J. Aggregating sustainability indicators: Beyond the weighted sum. *J. Environ. Manag.* **2012**, *111*, 24–33.
- [94] Coello, C. *A Short Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization*; Lecture Notes in Computer Science book series; LNCS: Springer Nature: Switzerland, 1993; Volume 1993.
- [95] Engel, A. *Verification, Validation and Testing of Engineered Systems*; Wiley Series in Systems Engineering and Management; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2010.
- [96] Ebert, U.; Welsch, H. Meaningful environmental indices: A social choice approach. *J. Environ. Econ. Manag.* **2004**, *47*, 270–283.

- [97] Barba-Romero, S.; Pomerol, J.C. *Decisiones Multicriterio: Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica*; Universidad de Alcalà: Madrid, Spain, 1995.
- [98] Kima, Do.; Ramina, M.; Chenga, V.; Javeda, A.; Kaluskara, S.; Kellya, N.; Kobilirisa, D.; Neumanna, A.; Nia, F.; Pelleria, T.; et al. An integrative methodological framework for setting environmental criteria: Evaluation of stakeholder perceptions. *Ecol. Inform.* **2018**, doi:10.1016/j.ecoinf.2018.08.005.
- [99] Boysso, D.; Marchant, T.; Pirlot, M.; Tsoukiàs, A.; Vincke, P. *Evaluation and Decision Models with Multiple Criteria: Stepping Stones for the Analyst*; Springer: New York, NY, USA, 2006.
- [100] Song, B.; Kang, S. A Method of Assigning Weights Using a Ranking and Nonhierarchy Comparison. *Adv. Decis. Sci.* **2016**, *2016*, 1–9, doi:10.1155/2016/8963214.
- [101] Saaty, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.* **2008**, *1*, 83.
- [102] Klutho, S. *Mathematical Decision Making: An Overview of the Analytic Hierarchy Process*; 2013. Available online: <https://www.whitman.edu/Documents/Academics/Mathematics/Klutho.pdf> (accessed on 13 June 2019).
- [103] OptEEmAL Partners. D4.4: Requirements and Design of the Simulation Model Input Generator; 2016.
- [104] García-Fuentes, M.; Serna, V.; Hernández, G. Evaluation and optimisation of energy efficient retrofitting scenarios for districts based on district performance indicators and stakeholders' priorities. In Proceedings of the Building Simulation and Optimisation 2018, Cambridge, UK, 11–12 September 2018.
- [105] OptEEmAL Partners. D4.3: Validation of the Optimisation Module; 2017.

## 11.6 Artículo 3: Impacto de los criterios de priorización en el diseño de proyectos de rehabilitación energética de barrios: un caso de estudio

- [106] Building Performance Institute of Europe: Principles for Nearly Zero-Energy Buildings. Available online: [http://bpie.eu/documents/BPIE/publications/LR\\_nZEB%20study.pdf](http://bpie.eu/documents/BPIE/publications/LR_nZEB%20study.pdf) (accessed on 03 April 2019).
- [107] Balaras, C.; Gaglia, A.; Georgopoulo, E.; Mirasgedis, S.; Sarafidis, S.; Lalas, D. (2007). European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. *Building and Environment.* **2011**, *42*. 1298–1314. 10.1016/j.buildenv.2005.11.001.
- [108] Building Performance Institute of Europe: Europe's Buildings under the microscope. Available online: [http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR\\_EU\\_B\\_under\\_microscope\\_study.pdf](http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/HR_EU_B_under_microscope_study.pdf) (accessed on 03 April 2019).

- [109] García-Fuentes, M. (2012). *Arquitectura y Energía: Modelos de climatización eficiente en edificios residenciales de alta eficiencia energética* (Trabajo Fin de Máster). Universidad de Valladolid, España.
- [110] UK Green Building Council: Health and wellbeing in homes. Available online: [https://www.worldgbc.org/sites/default/files/160705\\_Healthy\\_Homes\\_UK\\_full\\_report.pdf](https://www.worldgbc.org/sites/default/files/160705_Healthy_Homes_UK_full_report.pdf) (accessed on 03 April 2019).
- [111] European Parliament: Boosting Building Renovation: What Potential and Value for Europe? Available online: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587326/IPOL\\_STU\(2016\)587326\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587326/IPOL_STU(2016)587326_EN.pdf) (accessed on 03 April 2019).
- [112] Akadiri, P.O.; Chinyio, E.A.; Olomolaiye, P.O. Design of a sustainable building: A conceptual framework for implementing sustainability in the building sector. *Buildings*. **2012**, *2*, 126-152. 10.3390/buildings2020126.
- [113] OptEEmAL partners: Final booklet. Available online: [https://www.opteemal-project.eu/files/opteemal\\_final\\_booklet\\_web.pdf](https://www.opteemal-project.eu/files/opteemal_final_booklet_web.pdf) (accessed on 03 April 2019)
- [114] Bryde, D.; Broquetas, M.; Volm, J.M. The Project benefits of Building Information Modelling (BIM), *International Journal of Project Management*, **2013**, Volume 31, Issue 7, p. 971-980, ISSN 0263-7863.
- [115] AA.VV. *Integrated Project Delivery: A Guide*. American Institute of Architects, AIA California Council, 2014.
- [116] AA.VV. *Multi-criteria analysis: a manual*. Communities and Local Government Publications, Wetherby, 2014.
- [117] Pousse, M.; Martín, S.; Serna, V.; Álvarez, S.; Giannakis, G.; et al. D6.2: Report on platform prototype demonstration on technical and societal levels, H2020 Optimised Energy Efficient Design Platform for Refurbishment at District Level, Public Deliverable. Available online: <https://www.opteemal-project.eu/press-corner/publications/deliverables.html>.
- [118] ISO 16739 (2013). *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries*.
- [119] Kolbe, T. H.; Gröger, G.; Plumer, L. CityGML: Interoperable access to 3D city models. In *Geo-information for disaster management*. **2005**. pp. 883-899. Springer.
- [120] Giannakis, G.; Katsigarakis, K.; Lilis, G.N.; Álvarez-Díaz, S. Guidelines for OptEEmAL BIM input files. Available online: [https://www.opteemal-project.eu/files/guidelines\\_for\\_opteemal\\_bim\\_input\\_files\\_v11.pdf](https://www.opteemal-project.eu/files/guidelines_for_opteemal_bim_input_files_v11.pdf) (accessed 03 April 2019).
- [121] Izkara, J.L.; Prieto, I. Guidelines for OptEEmAL CityGML input files. Available online: [https://www.opteemal-project.eu/files/guidelines\\_for\\_opteemal\\_citygml\\_input\\_files\\_v5.pdf](https://www.opteemal-project.eu/files/guidelines_for_opteemal_citygml_input_files_v5.pdf) (accessed on 03 April 2019).

- [122] Costa, G.; Sicilia, Á.; Lilis, G.; Rovas, D.; Izkara, J.L. A comprehensive ontologies-based framework to support the retrofitting design of energy-efficient districts. European Conference on Product and process Modelling (ECPPM). **2016**. Cyprus.
- [123] Rovas, D.; Giannakis, G.; Lilis, G.; Katsigarakis, K.; Martín, A.; et al. D4.4: Requirements and design of the simulation model input generator module, H2020 Optimised Energy Efficient Design Platform for Refurbishment at District Level, Public Deliverable. Available online: <https://www.opteemal-project.eu/press-corner/publications/deliverables.html> (accessed 3 April 2019).
- [124] Crawley, D., Lawrie, L., Pedersen, C., Winkelmann, F. (2000). EnergyPlus: Energy Simulation Program. *ASHRAE Journal* **42**. **2000**. pp. 49-56.
- [125] De Tommasi, L., Ridouane, H., Giannakis, G., Katsigarakis, K., Lilis, G., Rovas, D. Model-based comparative evaluation of building and district control-oriented energy retrofit scenarios. *Buildings* **2018**, 8(7), 91. 10.3390/buildings8070091.
- [126] Peyser, Alexander et al. (2017). NEST 2.14.0. Zenodo. 10.5281/zenodo.882971
- [127] Hernández, G.; García-Fuentes, M.A.; Serna, V.; Giannakis, G.; Lilis, G.; et al. D2.2: Report on District Sustainability Indicators to formulate and optimise scenarios, H2020 Optimised Energy Efficient Design Platform for Refurbishment at District Level, Public Deliverable. Available online: <https://www.opteemal-project.eu/press-corner/publications/deliverables.html> (accessed 3 April 2019).
- [128] Manjarres, D., Mabe, L., Oregi, X., Landa-Torres, I., Arrizabalaga, E. A multi-objective harmony search algorithm for optimal energy and environmental refurbishment at district level scale in Proceedings of the 3rd International Conference on Harmony Search Algorithm (ICHSA 2017). **2017**. Springer.
- [129] Mollaoglu-Korkmaz, S.; Swarup, L.; Riley, D. Delivering sustainable, high-performance buildings: Influence of project delivery methods on integration and project outcomes. *Journal of Management in Engineering*, **2011**, vol. 29, no 1, p. 71-78.
- [130] García-Fuentes, M.A.; García-Pajares, R.; Sanz, C.; Meiss, A. Novel Design Support Methodology Based on a Multi-Criteria Decision Analysis Approach for Energy Efficient District Retrofitting Projects. *Energies* **2018**, *11*, 2368.
- [131] García-Fuentes, M.A.; Serna, V.; Hernández, G.; Meiss, A. An evaluation framework to support optimisation of scenarios for energy efficient retrofitting of buildings at district level (under evaluation).
- [132] Hernández, G., Serna, V., García-Fuentes, M.A. Design of energy efficiency retrofitting projects for districts based on performance optimisation of District Performance Indicators calculated through simulation models. *Energy Procedia*, **2017**, *122* Pages 721-726, ISSN: 1876-6102. 10.1016/j.egypro.2017.07.386.
- [133] Mabe, L.; Garcia, M.A.; Escudero, A.; Giannakis, G.; Aguirre, P.; De Tommasi, L.; Marneli, G.; Manjarres, D.; Hernandez, G.; Pousse, M.; et al. D4.1: Requirements and Design of the Optimization Module, H2020 Optimized Energy Efficient Design Platform for Refurbishment at District Level, Public Deliverable. Available online:

<https://www.opteemal-project.eu/press-corner/publications/deliverables.html>

(accessed 3 April 2019).

- [134] Song, B., Kang, S. A method of assigning weights using a ranking and non-hierarchy comparison. *Advances in Decision Sciences*. **2016**. 10.1155/2016/8963214
- [135] García-Fuentes, M.A.; Serna, V.; Hernández, G. Evaluation and optimisation of energy efficient retrofitting scenarios for districts based on district performance indicators and stakeholders' priorities. Conference Paper. *Building Simulation and Optimisation 2018*, Cambridge.
- [136] García-Fuentes, M.A.; Pujols, C.; García-Pajares, R. Residential areas retrofitting towards nearly Zero Energy Districts (nZED). A case study: Valladolid-Cuatro de Marzo. Proceedings of the World Sustainable Buildings 2014 Conference. **2014**. Barcelona.
- [137] R2CITIES Consortium partners, R2CITIES website: [http://r2cities.eu/demos/the\\_case\\_studies.kl](http://r2cities.eu/demos/the_case_studies.kl) (accessed on 03 April 2019)
- [138] García-Fuentes, M.A.; Pujols, C.; García-Pajares, R.; Vasallo, A.; Martín, A. Metodología de Rehabilitación Energética hacia Distritos Residenciales de Energía Casi Nula. Aplicación al barrio del Cuatro de Marzo (Valladolid). II Congreso EECN. **2013**. Madrid.
- [139] Pousse, M.; Martín, S.; Serna, V.; Álvarez, S.; Giannakis, G.; et al. D6.2: Report on platform prototype demonstration on technical and societal levels, H2020 Optimised Energy Efficient Design Platform for Refurbishment at District Level, Public Deliverable. Available online: <https://www.opteemal-project.eu/press-corner/publications/deliverables.html> (to be published on 30 April 2019).
- [140] Autodesk Revit website. Available online: <https://www.autodesk.es/products/revit/overview> (accessed on 03 April 2019).
- [141] CityEditor plugin website. Available online: <https://extensions.sketchup.com/sv/content/cityeditor-2> (accessed on 03 April 2019).
- [142] SketchUp website. Available online: <https://www.sketchup.com/es/plans-and-pricing/sketchup-free> (accessed on 03 April 2019).
- [143] Bing Maps website. Available online: <https://www.bing.com/maps/aerial> (accessed on 03 April 2019).
- [144] Lilis, G.N.; Giannakis, G.; Katsigarakis, K.; Rovas, D. District-aware Building Energy Performance Simulation model generation from GIS and BIM Data. Building Simulation and Optimisation Conference. **2018**. UK.
- [145] Pousse, M.; Martín, S.; Serna, V.; Álvarez, S.; Giannakis, G.; et al. D6.2: Report on platform prototype demonstration on technical and societal levels, H2020 Optimised Energy Efficient Design Platform for Refurbishment at District Level, Public Deliverable. Available online: <https://www.opteemal-project.eu/press-corner/publications/deliverables.html>.
- [146] Ballarini, I.; Corrado, V. A New Methodology for Assessing the Energy Consumption of Building Stocks. *Energies* **2017**, *10*, 1102.



**ANEXOS**





## 12 Anexos

### 12.1 Artículos publicados objeto de la tesis

- [01] **García-Fuentes, M.Á.**; García-Pajares, R.; Sanz, C.; Meiss, A. Novel Design Support Methodology Based on a Multi-Criteria Decision Analysis Approach for Energy Efficient District Retrofitting Projects. *Energies* **2018**, *11*, 2368. <https://doi.org/10.3390/en11092368>
- [02] **García-Fuentes, M.Á.**; Serna, V.; Hernández, G.; Meiss, A. An Evaluation Framework to Support Optimisation of Scenarios for Energy Efficient Retrofitting of Buildings at the District Level. *Appl. Sci.* **2019**, *9*, 2448. <https://doi.org/10.3390/app9122448>
- [03] **García-Fuentes, M.Á.**; Álvarez, S.; Serna, V.; Pousse, M.; Meiss, A. Integration of prioritisation criteria in the design of energy efficient retrofitting projects at district scale: a case study. *Sustainability* **2019**, *11*, 3861. <https://doi.org/10.3390/su11143861>

### 12.2 Factor de impacto y área temática de las publicaciones

A continuación se detalla el factor de impacto y el área temática al que pertenecen las revistas donde se han publicado los tres artículos objeto de la presente tesis doctoral.

**Tabla 33.** Relación de factor de impacto y área temática de las publicaciones.

Revista	Factor de impacto	Categoría JCR	Área temática
ENERGIES	2.707	56/103 (Q3)	Energy & Fuels
		67/148 (Q2)	Physics, Applied
APPLIED SCIENCES	2.217	89/172 (Q3)	Chemistry, Multidisciplinary
		151/293 (Q3)	Materials Science, Multidisciplinary
		105/250 (Q2)	Environmental Sciences
SUSTAINABILITY	2.592	20/35 (Q3)	Green & sustainable science and technology
		3/6 (Q2)	Green & sustainable science and technology (SSCI)
		44/116 (Q2)	Environmental Studies (SSCI)

## 12.3 Justificación de las contribuciones del doctorando a los artículos

A continuación se detallan las contribuciones del doctorando a los artículos que conforman la presente tesis doctoral que se corresponde con lo establecido en el Anexo II sobre la Aceptación de los Coautores para la Tesis por Compendio de Publicaciones que se rige por el artículo 8.1.f de la Normativa para la Presentación y defensa de la Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid. Igualmente, estas contribuciones aparecen reflejadas en los propios artículos en la sección de Contribuciones de los Autores.

**Tabla 34.** Justificación de las contribuciones del doctorando a los artículos

Artículo	Contribución
<u>GARCÍA-FUENTES, M.Á.; GARCÍA-PAJARES, R.; SANZ, C.; MEISS, A. (2018). Novel Design Support Methodology Based on a Multi-Criteria Decision Analysis Approach for Energy Efficient District Retrofitting Projects. <i>Energies</i> 2018, Volume 11, 2368. <a href="https://doi.org/10.3390/en11092368">https://doi.org/10.3390/en11092368</a></u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conceptualización</li> <li>• Análisis formal de los resultados</li> <li>• Investigación</li> <li>• Diseño de la metodología</li> <li>• Identificación de recursos</li> <li>• Validación de resultados</li> <li>• Redacción, revisión y edición</li> </ul>
<u>GARCÍA-FUENTES, M.Á.; SERNA, V.; HERNÁNDEZ, G.; MEISS, A. (2019) An Evaluation Framework to Support Optimisation of Scenarios for Energy Efficient Retrofitting of Buildings at the District Level. <i>Appl. Sci.</i> 2019, Volume 9, 2448. <a href="https://doi.org/10.3390/app9122448">https://doi.org/10.3390/app9122448</a></u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conceptualización</li> <li>• Diseño de la metodología</li> <li>• Análisis formal de los resultados</li> <li>• Validación de resultados</li> <li>• Investigación</li> <li>• Redacción, revisión y edición</li> </ul>
<u>GARCÍA-FUENTES, M.Á.; ÁLVAREZ, S.; SERNA, V.; POUSSE, M.; MEISS, A. (2019) Integration of prioritisation criteria in the design of energy efficient retrofitting projects at district scale: a case study. <i>Sustainability</i> 2019, Volume 11, 3861. <a href="https://doi.org/10.3390/su11143861">https://doi.org/10.3390/su11143861</a></u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conceptualización</li> <li>• Diseño de la metodología</li> <li>• Análisis formal de los resultados</li> <li>• Validación de resultados</li> <li>• Investigación</li> <li>• Redacción, revisión y edición</li> </ul>

## 12.4 Artículos complementarios del doctorando

A continuación se incluyen otros artículos relevantes producidos por el doctorando que, a pesar de no formar parte del núcleo de la tesis, han servido de soporte para los trabajos desarrollados en la misma.

### 12.4.1 Artículos en revistas

- [01] Meiss, A., Feijó-Muñoz, J., García-Fuentes, M. (2013). *Age-of-the-air in rooms according to the environmental condition of temperature: a case study*. Energy & buildings, volume 67, December 2013, Pages 88-96, ISSN 0378-7788. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.016> (JCR impact factor 4,495).
- [02] García-Fuentes, M.A., De Torre, C. (2017). *Towards Smarter and more Sustainable Cities: the REMOURBAN model*. Entrepreneurship and Sustainability Issues, volume 4, March 2017, Pages 328-338, ISSN 2345-0282. [http://dx.doi.org/10.9770/jesi.2017.4.3S\(8\)](http://dx.doi.org/10.9770/jesi.2017.4.3S(8)) (SJR indicator 1,171).
- [03] García-Fuentes, M.a., Quijano, A., De Torre, C., García, R., Compere, P., Tomé, I. (2017). *European Cities characterisation as basis towards the replication of a Smart and Sustainable Urban Regeneration Model*. Energy Procedia, volume 111, March 2017, Pages 836-845, ISSN: 1876-6102. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.246> (SJR indicator 0,545).
- [04] Cui, J.M., Ianakiev, A., García-Fuentes, M.A. (2017). *To examine appropriate deep-retrofit practice using simulation results in an EU-funded urban regeneration project*. Energy Procedia, volume 105, May 2017, Pages 2549-2556, ISSN: 1876-6102. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.733> (SJR indicator 0,545).
- [05] Hernández, G., Serna, V., García-Fuentes, M.A. (2017). *Design of energy efficiency retrofitting projects for districts based on performance optimisation of District Performance Indicators calculated through simulation models*. Energy Procedia, Volume 122, September 2017, Pages 721-726, ISSN: 1876-6102. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.386> (SJR indicator 0,545).
- [06] García-Fuentes, M.Á.; García-Pajares, R.; Sanz, C.; Meiss, A. (2018). *Novel Design Support Methodology Based on a Multi-Criteria Decision Analysis Approach for Energy Efficient District Retrofitting Projects*. Energies 2018, Volume 11, 2368. <https://doi.org/10.3390/en11092368> (JCR impact factor 2,707).
- [07] García-Fuentes, M.Á.; Serna, V.; Hernández, G.; Meiss, A. (2019) *An Evaluation Framework to Support Optimisation of Scenarios for Energy Efficient Retrofitting of Buildings at the District Level*. Appl. Sci. 2019, Volume 9, 2448. <https://doi.org/10.3390/app9122448> (JCR impact factor 2,217).
- [08] García-Fuentes, M.Á.; Álvarez, S.; Serna, V.; Pousse, M.; Meiss, A. (2019) *Integration of prioritisation criteria in the design of energy efficient retrofitting projects at district scale: a case study*. Sustainability 2019, Volume 11, 3861. <https://doi.org/10.3390/su11143861> (JCR impact factor 2,592).
- [09] García-Fuentes, M., Hernández, G., Serna, V., Martín, S., Álvarez, S., Lillis, G. N., Giannakis, G., Katsigarakis, K., Mabe, L., Oregi, X., Manjarres, D., El Ridouane, H., De Tommasi, L. (2019) *OptEEmAL: Decision-support tool for the design of energy retrofitting projects at district level*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 290, 012129. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012129> (SJR indicator 0,198).

- [10] Antolín, J., De Torre, C., García-Fuentes, M.A., Pérez, A., Tomé, I., Mirantes, M.L., Hoyos, E. (2020). *Development of an evaluation framework for smartness and sustainability in cities*. Sustainability 2020, Volume 12, 5193. <https://doi.org/10.3390/su12125193> (JCR impact factor 2,592).
- [11] De Torre, C., Antolín, J., García-Fuentes, M.A., Fernández, I., Gómez, J., Irigoyen, A. (2020). *Achieving a nearly zero energy district through integration of renewable energy: a case study in Valladolid (Spain)*. DYNA Ingeniería e Industria. (JCR impact factor 0,629) Aceptado para publicación.

#### 12.4.2 Capítulos de libros

- [01] Hernández, J.L., García-Fuentes, M.A., Sanz, R., Corredera, A. (2014). Case Study 7 – Industrial Engineering School, Béjar. Spain. En Troi, A., y Bastian, Z. (Ed.), *Energy efficiency solutions for historic buildings: a handbook* (pp. 300-311). Basel: Birkhäuser Verlag GmbH. ISBN: 978-3-03821-646-9.

#### 12.4.3 Contribución a congresos y conferencias nacionales

- [01] Alcalde, B., Nieto, C., García-Fuentes, M., González, T., Hernández, J. (2009) *La envolvente del Urcomante*. Ciclo de Conferencias “Fragmentos de Arquitectura. La obra de Primitivo González”. Valladolid, España.
- [02] Alcalde, B., García-Fuentes, M. (2010) *Un proyecto de Casa Solar: la envolvente del Urcomante*. Jornada técnica Solar Decathlon Europe 2010. Genera 2010. Madrid, España.
- [03] García-Fuentes, M., González, T. (2010) *Nueva conciencia de habitar*. Cursos de Verano del País Románico: Construcción Sostenible y Desarrollo Rural. Palencia, España.
- [04] García-Fuentes, M. (2010) *Sostenibilidad y construcción en madera*. Congreso del Colegio Oficial de Arquitectos de Galicia sobre Ecoinnovación y Construcción. Ourense, España.
- [05] García-Fuentes, M., Meiss, A., Hernández-García, J., de Torre, C., García-Gil, D. (2013). Aplicación del estándar Passivhaus a la rehabilitación energética de edificios: estudio de caso en la E.T.S.I.I. de Béjar (Salamanca). 5ª Conferencia Española Passivhaus. Gijón, España.
- [06] García-Fuentes, M.A., García-Pajares, R. (2013). *R2CITIES. Renovación de espacios urbanos residenciales: hacia Ciudades de Consumo Casi Nulo*. Ponente invitado en III Workshop de Edificios de Energía Casi Nula, Madrid, España.
- [07] García-Fuentes, M.A., Pujols, C., García-Pajares, R., Vasallo, A., Martín, A. (2013). Metodología de Rehabilitación Energética hacia Distritos Residenciales de Energía Casi Nula. Aplicación al barrio del Cuatro de Marzo (Valladolid). II Congreso de Edificios de Energía Casi Nula (EECN), Madrid, España.
- [08] De Torre, C., González, I., Gordaliza, A., García-Fuentes, M.A., Romera, D. (2016). Rehabilitación energética del barrio residencial Fasa-Renault con criterios de distrito

de energía casi nula dentro del marco del proyecto faro REMOURBAN. III Congreso de Edificios de Energía Casi Nula (EECN), Madrid, España.

- [09] García-Fuentes, M.A., Hernández, G., Serna, V., Vicente, J. (2016). *OptEEmAL: una herramienta de diseño para proyectos de rehabilitación de áreas urbanas hacia distritos de energía casi nula*. III Congreso de Edificios de Energía Casi Nula (EECN), Madrid, España.
- [10] Bello, C., Mirantes, M.L., De Torre, C., Martín, S., García-Fuentes, M.A. (2016). Infraestructuras y procesos integrados en el entorno Smart City: el proyecto faro REMOURBAN. II Congreso de Ciudades Inteligentes, Madrid, España.
- [11] De Torre, C., Vallejo, E., Massa, G., García-Fuentes, M. (2018). *Modelo de regeneración urbana para la transformación de ciudades en entornos más inteligentes y sostenibles*. Libro de Comunicaciones del IV Congreso de Ciudades Inteligentes. Madrid, Spain.
- [12] Vélez, F.; García, M.; Vallejo, E.; Sanz, C.; De Torre, C. (2018) Regeneración urbana para la transformación de las ciudades en entornos más inteligentes y sostenibles: Casos de éxito en el área metropolitana de Valladolid. I Congreso Iberoamericano de Ciudades Inteligentes 2018, Soria, España, 26-27 Septiembre 2018. ISBN 978-958-5522-51-0.
- [13] González, I., Gordaliza, A., De Torre, C., García-Fuentes, M. (2018). *Integración de energía fotovoltaica en la red de calor de biomasa del distrito de Fasa en Valladolid*. Actas del XVI Congreso Ibérico y XII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. Madrid, Spain.
- [14] García-Fuentes, M.A., Antolín, J., Tomé, I., Mirantes, M.L., de Torre, C. (2020). *Evaluación de la sostenibilidad e inteligencia de una ciudad: marco de evaluación de REMOURBAN*. Libro de Comunicaciones del VI Congreso de Ciudades Inteligentes. Madrid, Spain.

#### **12.4.4 Contribución a congresos y conferencias internacionales**

- [01] Valmaseda, C., García-Fuentes, M., Hernández, J., Martín, S. (2012). *BaaS Project: covering the building design- and operational-phase interoperability gap*. Conference paper. Proceedings of International Conference for Enhanced Building Operations (ICEBO) 2012. Manchester, UK.
- [02] de Torre, C., Simonis, H., Macía, A., García, M., Valmaseda, C. (2013). Thermal energy flow balancing for optimizing energy performance in public swimming pools with solar thermal micro-generation: A Case Study. Conference paper. Proceedings of Central European Symposium on Building Physics 2013. Vienna, Austria.
- [03] García-Fuentes, M., Hernández, J., de Torre, C., García-Gil, D., Meiss, A. (2013). Energy efficiency and comfort conditions improvement on historic buildings: a methodology approach for diagnosis and interventions. Conference paper. Proceedings of Central European Symposium on Building Physics (CESBP) 2013. Vienna, Austria.

- [04] Valmaseda, C., Katsigarakis, K., García-Fuentes, M.A., Hernández García, J.L., Kontes, G., Rovas, D. (2013). *An Event-Driven SOA-based platform for energy-efficiency applications in buildings*. Conference paper. CIB W78 2013 – 30<sup>th</sup> International Conference on Applications of the IT in the AEC Industry. Beijing, China.
- [05] Rodríguez, J., Ditter, H., Hoettges, K., García, M.A., Bujedo, L.A. (2014). *Energy simulation for predictive building control*. Conference paper. Proceedings of 10th European Conference on Product and Process Modelling. Vienna, Austria.
- [06] García-Fuentes, M.A., Vasallo, A., García-Pajares, R., Pujols, W.C., Meiss, A. (2014). *Residential areas retrofitting towards nearly Zero Energy Districts (nZED). A case study: Valladolid-Cuatro de Marzo district*. Poster. Proceedings of World Sustainable Building 2014. Barcelona, Spain.
- [07] García-Fuentes, M.A., García-Pajares, R., Pujols, W.C., Sozer, H., Morbiducci, R. (2015). *A comprehensive methodology to evaluate residential districts retrofitting towards nearly Zero Energy Districts (nZED)*. Conference presentation. Smart Cities Conference: Intelligent buildings, energy, mobility, ICT & emerging management. Sofia, Bulgaria.
- [08] García-Pajares, R., García-Fuentes, M.A., Vasallo, A., Sanz, S. (2015). *How to finance Smart-City projects: nine real case studies across EU*. Conference presentation. Smart Cities Conference: Intelligent buildings, energy, mobility, ICT & emerging management. Sofia, Bulgaria.
- [09] García-Fuentes, M.A. (2015). *Lighting the way for Smart Cities: REMOURBAN Project*. Invited Speaker. Seminar Lighting the way for Smart Cities: the EU lighthouse projects as guides to a greener future organised by the Norway Mission to the EU. Brussels, Belgium.
- [10] García-Fuentes, M.A., Hernández, J.L., Meiss, A., Colla, C. (2015). *Comprehensive diagnosis methodology integrating NDT, energy performance simulation and monitoring techniques for energy efficient historic buildings refurbishment*. In Van Ehemlrijck, D., Valdanduit, S., Athanasios, A., Philippidis, P. (Ed.), Proceedings of the 6th International Conference on Emerging Technologies in Non-Destructive Testing (pp. 397-403). CRC Press 2015. ISBN: 978-1-315-64754-8. DOI: 10.1201/b19381-68.
- [11] Giannakis, G.I., Lilis, G.N., García-Fuentes, M.A., Kontes, G., Valmaseda, C., Rovas, D. (2015). *A methodology to automatically generate geometry inputs for energy performance simulation from IFC BIM models*. Conference paper. Proceedings of Building Simulation Conference 2015 (14<sup>th</sup> Conference of IBPSA). Hyderabad, India.
- [12] García-Fuentes, M.A. (2016). *Smart Refurbishment towards low emission cities: REMOURBAN Project*. Invited Keynote Speaker. 8<sup>th</sup> European Conference on Sustainable Cities and Towns. Bilbao, Spain.
- [13] Lilis, G.N., Giannakis, K., Katsigarakis, K., Rovas, D., Costa, G., Sicilia, A., García-Fuentes, M. (2016). *Simulation model generation combining IFC and CityGML data*. Conference paper. eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECCPPM 2016: Proceedings of 11th European Conference on Product and Process Modelling. Limassol, Cyprus.

- [14] García-Fuentes, M.A., Quijano, A., de Torre, C., García, R., Compere, P., Degard, C., Tomé, I. (2016). *European cities characterisation as basis towards the replication of a Smart and Sustainable Urban Regeneration Model*. Conference paper. Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Sustainability in Energy and Buildings. Turin, Italy.
- [15] Colla, C., García-Fuentes, M.A., Hernández, J.L., Meiss, A. (2016). *Thermal behaviour and comfort of a building pre-and post-intervention: the case of the Engineering School of Béjar*. Conference paper. Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings. Brussels, Belgium.
- [16] Quijano, A., de Torre, C., García-Fuentes, M.A., Compere, P., Tomé, I. (2016). *Characterisation of cities as strategy for urban planning: methodology applied in the REMOURBAN Project*. Conference paper. Proceedings of Smart City Expo World Congress: cities for citizens. Barcelona, Spain.
- [17] García-Fuentes, M.A., González, I., Gordaliza, A., de Torre, C., (2017). *Retrofitting of a residential district under near zero energy buildings criteria*. Proceedings 2017, Volume 1, 686. <https://doi.org/10.3390/proceedings1070686>
- [18] Criado, C., Vallejo, E., Arrizabalaga, E., Vallallo, A., García-Fuentes, M.A., (2017). *KPI-Driven methodology for Urban Renovation at District Level. Sustainable Strategic urban Planning*. Proceedings 2017, Volume 1, 1114. <https://doi.org/10.3390/proceedings1071114>
- [19] García-Fuentes, M.A., Serna, V., Hernández, G. (2018). Evaluation and optimisation of energy efficient retrofitting scenarios for districts based on district performance indicators and stakeholders' priorities. Proceedings of 4<sup>th</sup> Building Simulation and Optimisation Conference. Cambridge, UK.
- [20] García-Fuentes, M., Hernández, G., Serna, V., Martín, S., Álvarez, S., Lilis, G. N., Giannakis, G., Katsigarakis, K., Mabe, L., Oregi, X., Manjarres, D., El Ridouane, H., De Tommasi, L. (2019) *OptEEmAL: Decision-support tool for the design of energy retrofitting projects at district level*. CESB2019, Prague, Czech Republic, 2-4 July 2019.
- [21] Martin, S., Serna, V., Alvarez, S, Garcia-Fuentes, M., Hernandez, G., Sicilia, A., Costa, G. (2019) *OptEEmAL: IT-supported desing tool for the generation of optimised energy retrofitting scenarios at district level*. EC3 2019, Crete, Greece, 10-12 July 2019.
- [22] Álvarez, S., García-Fuentes, M.A., Hernández, G., Serna, V., Martín, S. (2019) *Simulation based tool to design energy efficient retrofitting projects at district level: A case study*. 4<sup>th</sup> Conference on Advanced Building Skins, Bern, Switzerland, 28-29 October 2019.





**COPIA DE LOS ARTÍCULOS  
PUBLICADOS OBJETO DE LA TESIS  
DOCTORAL Y ARTÍCULOS  
COMPLEMENTARIOS**



## 13 Copia de los artículos publicados objeto de la tesis doctoral y artículos complementarios

A continuación se incluyen los artículos publicados que conforman el núcleo de la presente tesis doctoral así como una serie de artículos complementarios seleccionados de los que se listan en el capítulo anterior. Los artículos complementarios que se incluyen se corresponden con aquellos que han estado directamente relacionados con los trabajos desarrollados en el marco de esta tesis doctoral y que han influido, por tanto, a sus planteamientos metodológicos, desarrollo de la investigación o consecución de los resultados. La siguiente tabla muestra la relación de estos artículos con la tesis doctoral.

**Tabla 35.** Listado de artículos seleccionados por su relevancia para la tesis doctoral.

	Artículo	Contribución
ARTÍCULOS EN REVISTAS	To examine appropriate deep-retrofit practice using simulation results in an EU-funded urban regeneration project.	Artículo que trabaja sobre la identificación y evaluación de escenarios de rehabilitación energética. No es resultado directo de los trabajos de la tesis, pero ha contribuido a desarrollar capacidades en el ámbito de evaluar alternativas de diseño para la rehabilitación.
	Design of energy efficiency retrofitting projects for districts based on performance optimisation of District Performance Indicators calculated through simulation models.	Artículo sobre el proyecto OptEEmAL centrado en los indicadores que conforman el esquema de evaluación descrito en la tesis doctoral.
	Retrofitting of a residential district under near zero energy buildings criteria.	Artículo sobre la rehabilitación energética del distrito de FASA en Valladolid, donde a pesar de no haberse implementado la metodología ha servido para adquirir conocimientos en el ámbito de la rehabilitación de barrios.
	OptEEmAL: Decision-support tool for the design of energy retrofitting projects at district level.	Artículo sobre el proyecto OptEEmAL que describe la herramienta de manera global. No se centra en los aspectos concretos de la tesis doctoral pero es relevante desde el punto de vista de contexto.

	Artículo	Contribución
CAPÍTULOS DE LIBROS	Case Study 7 – Industrial Engineering School, Béjar. Spain.	Capítulo de libro sobre la rehabilitación energética de la Escuela de Ingenieros de Béjar dentro del proyecto 3encult. A pesar de no abordar las cuestiones que conforman el núcleo de la tesis, esta rehabilitación energética dio origen a los planteamientos metodológicos que fueron el inicio de la metodología planteada para Cuatro de Marzo.
	Aplicación del estándar Passivhaus a la rehabilitación energética de edificios: estudio de caso en la E.T.S.I.I. de Béjar (Salamanca).	Artículo sobre la rehabilitación energética de la Escuela de Ingenieros de Béjar dentro del proyecto 3encult. A pesar de no abordar las cuestiones que conforman el núcleo de la tesis, esta rehabilitación energética dio origen a los planteamientos metodológicos que fueron el inicio de la metodología planteada para Cuatro de Marzo.
CONFERENCIAS Y CONGRESOS NACIONALES	Metodología de Rehabilitación Energética hacia Distritos Residenciales de Energía Casi Nula. Aplicación al barrio del Cuatro de Marzo (Valladolid).	Artículo sobre la rehabilitación energética del Cuatro de Marzo dentro del proyecto R2CITIES. Se considera relevante como parte del contexto.
	Rehabilitación energética del barrio residencial Fasa-Renault con criterios de distrito de energía casi nula dentro del marco del proyecto faro REMOURBAN.	Artículo sobre la rehabilitación energética del distrito de FASA en Valladolid, donde a pesar de no haberse implementado la metodología ni ser utilizado como demostrador, ha servido para adquirir conocimientos en el ámbito de la rehabilitación de barrios.
	OptEEmAL: una herramienta de diseño para proyectos de rehabilitación de áreas urbanas hacia distritos de energía casi nula.	Artículo sobre el proyecto OptEEmAL que describe la herramienta de manera global. No se centra en los aspectos concretos de la tesis doctoral pero es relevante desde el punto de vista de contexto.
	BaaS Project: covering the building design- and operational-phase interoperability gap.	Artículo sobre la cuestión de la interoperabilidad entre modelos BIM y modelos de simulación energética. Aunque este tema no se aborda directamente como parte de la tesis doctoral, la herramienta OptEEmAL basa su funcionamiento en un marco de interoperabilidad que trabaja sobre los principios descritos en este artículo y en los que el doctorando ha trabajado.
CONFERENCIAS Y CONGRESOS INTERNACIONALES	Energy efficiency and comfort conditions improvement on historic buildings: a methodology approach for diagnosis and interventions.	Artículo sobre la rehabilitación energética de la Escuela de Ingenieros de Béjar dentro del proyecto 3encult. A pesar de no abordar las cuestiones que conforman el núcleo de la tesis, esta rehabilitación energética dio origen a los planteamientos metodológicos que fueron el inicio de la metodología planteada para Cuatro de Marzo.

Artículo	Contribución
Residential areas retrofitting towards nearly Zero Energy Districts (nZED). A case study: Valladolid-Cuatro de Marzo district.	Artículo sobre la rehabilitación energética del Cuatro de Marzo dentro del proyecto R2CITIES. Se considera relevante como parte del contexto.
A methodology to automatically generate geometry inputs for energy performance simulation from IFC BIM models.	Artículo sobre la cuestión de la interoperabilidad entre modelos BIM y modelos de simulación energética. Aunque este tema no se aborda directamente como parte de la tesis doctoral, la herramienta OptEEmAL basa su funcionamiento en un marco de interoperabilidad que trabaja sobre los principios descritos en este artículo y en los que el doctorando ha trabajado.
Simulation model generation combining IFC and CityGML data.	Artículo sobre la cuestión de la interoperabilidad entre modelos BIM y modelos de simulación energética. Aunque este tema no se aborda directamente como parte de la tesis doctoral, la herramienta OptEEmAL basa su funcionamiento en un marco de interoperabilidad que trabaja sobre los principios descritos en este artículo y en los que el doctorando ha trabajado.
Retrofitting of a residential district under near zero energy buildings criteria.	Artículo sobre la rehabilitación energética del distrito de FASA en Valladolid, donde a pesar de no haberse implementado la metodología ni ser utilizado como demostrador, ha servido para adquirir conocimientos en el ámbito de la rehabilitación de barrios.
Evaluation and optimisation of energy efficient retrofitting scenarios for districts based on district performance indicators and stakeholders' priorities.	Artículo sobre el proyecto OptEEmAL centrado en la cuestión de la evaluación que se aborda directamente en la tesis doctoral.
OptEEmAL: IT-supported desing tool for the generation of optimised energy retrofitting scenarios at district level	Artículo sobre el proyecto OptEEmAL que describe la herramienta de manera global. No se centra en los aspectos concretos de la tesis doctoral pero es relevante desde el punto de vista de contexto.
Simulation based tool to design energy efficient retrofitting projects at district level: A case study.	Artículo sobre el proyecto OptEEmAL centrado en las validaciones sobre el caso de Cuatro de Marzo que se aborda directamente en la tesis doctoral.

