

**Doktore-tesia**

**Bizitegi-parkeen birgaitze energetikorako ikuspegi integrala**

---

**Bilboko kasua**

Jon Fernandez Luzuriaga



Zuzendariak:

Iván Flores Abascal

Luis del Portillo Valdés

**2023**

eman ta zabal zazu



Universidad  
del Pais Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Bizitegi-parkeen birgaitze energetikorako ikuspegi  
integrala: Bilboko kasua**

## Laburpena

Larrialdi klimatikoaren eta kanpo-mendekotasun energetikoaren erronkei aurre egiteko, Europar Batasunak 2050ean klimatikoki neutroa den ekonomia baterantz jotzeko konpromisoa berretsi du. Helburu hori erdiesteko, «lehenik, energia-eraginkortasuna»-ren lema Europako klima eta energia arloko gobernantzaren printzipio gidaria bilakatu da.

Europar, eraikuntza-sektorea azken energia-kontsumoaren %40aren erantzule da, eta CO<sub>2</sub> emisioen %36 sortzen du. Izan ere, egungo eraikin-parkearen antzintasuna handia da eta tarte handia du bere eraginkortasun energetikoa hobetzeko. Halaber, eraikinen ordezkapen-tasa nahiko txikia da eta, beraz, eraikin berriek, eraginkorragoak direnak, energia-kontsumoaren eta CO<sub>2</sub> emisioen murrizketan izan dezaketen eragina mugatua da. Hala, karbono gutxiko ekonomia lehiakor baterako trantsizioan, egungo eraikin-parkearen birgaitze energetikoa lehentasun bat da Europar Batasunarentzat.

Hala ere, hori sustatzeko laguntza-mekanismoak ezarri diren arren, Europar bizitegi-eraikinen urteko birgaitze-tasa baxua izaten jarraitzen du. Beharrezkoa da, beraz, birgaitze energetikoko prozesuaren alderdi ezberdinetan sakontzea, egungo birgaitze-tasa eta energia-aurrezkia areagotu ditzakeen energia-plangintza adimentsua definitu ahal izateko.

Halaber, tokiko agintariak laguntza handia izan dezakete eraginkortasun energetikoko politikak ezartzeko eta, alde horretatik, gero eta joera handiagoa dago azterketa energetikoko tresnak hiri-mailara egokitzeko.

Eremu horietan laguntzeko asmoz, tesi honek hiru ikerketa-ildo lantzen ditu: egungo bizitegi-parkearen karakterizazioa, eraginkortasun energetikoko neurrien analisi tekniko-ekonomikoa eta etxejabeek beren etxebizitzak birgaitzeko erabaki-prozesuaren azterketa. Garatutako ezagutzak eraginkortasun energetikoko politikak zehazten lagundu dezake, finantza-baliabide publikoen ustiapen eraginkorra bermatzen dutenak.

Alde batetik, tesiak hiri-mailako bizitegi berokuntza-kontsumoa karakterizatzeko metodologia bat aurkezten du. Metodologia horrek, hurbileko ikuspegi baten bidez, egungo bizitegi-parkea etxebizitza-kategoria ezberdinetan sailkatzea baimentzen du, energia-eraginkortasuneko politika egokienak ikertzeko oinarri gisa. Proposaturiko metodologia Bilboko bizitegi-parkean inplementatu da, eraikin-arketipo nagusiak identifikatuz.

Karakterizazio horretan oinarrituta, eta eraginkortasun energetikoa sustatu beharreko lehentasunezko eremuak identifikatzeko asmoz, ondoren birgaitze energetikoko hainbat neurriren azterketa tekniko-ekonomikoa burutu da, eraikin-arketipo bakoitzean. Europako Batzordeak zehaztutako kostu-maila optimoaren metodologia egokituz, eraikin mota bakoitzean sustatu daitekeen energia-jarduera tarte egokia identifikatu eta hori erdiesten lagun dezaketen pizgarri ekonomiko ezberdinek amortizazio-epean izango luketen eragina ebaluatu da.

Hala ere, analisi tekniko-ekonomiko horrek ez ditu etxebizitzaren arteko desberdintasun sozioekonomikoak kontutan hartzen. Izan ere, etxejabe bakoitzak modu desberdinean balora ditzake birgaitze energetikoak dakartzan onurak eta, ondorioz, birgaitze hori aurrera eramateko prestasuna asko alda liteke kasu batetik bestera.



Beraz, azterketa tekniko-ekonomikoa osatzeko eta giza faktore hori aztertzeko, azkenik etxejabeek beren etxeak termikoki isolatzeko erabaki-prozesua ikertu da. Azken hau baldintzatzen duten faktoreak ebaluatuz, aukera diskretuko eredu bat garatu da, zeinaren aplikazioa Espainian oraindik ere mugatua den arlo espezifiko honetan. Tesi honek hutsune hori bete nahi du hein batean.

Aukera diskretuko eredu horrek hainbat laguntza-mekanismok etxebizitza-kategoria ezberdinek energetikoki birgaitzeko probabilitatean izan ditzaketen eragina ebaluatzeko aukera ematen du, finantza-baliabide publikoak ahalik eta hobekien esleitzen lagunduz.

Laburbilduz, tesi honetan garatutako esparru metodologiko orokorrak birgaitze energetikoko politikak hurbileko ikuspegi batetik formulatzen laguntzen du eta tokiko agintariak prozesu horretan laguntzeko informazioa ematen du.

## Resumen

Con objeto de abordar los retos de la emergencia climática y de la dependencia energética exterior, la Unión Europea ha ratificado su compromiso de avanzar hacia una economía climáticamente neutra en 2050. Para alcanzar este objetivo, el lema «primero, la eficiencia energética» se ha convertido en el principio rector de la gobernanza europea en materia de clima y energía.

En Europa, el sector de la edificación es responsable del 40% del consumo de energía final, y genera el 36% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Efectivamente, el parque edificatorio actual tiene una elevada antigüedad y dispone de un amplio margen de mejora en eficiencia energética. Asimismo, la tasa de sustitución de los edificios es relativamente baja, por lo que el impacto de los nuevos edificios, más eficientes, sobre la reducción del consumo de energía y de las emisiones de CO<sub>2</sub> es limitado. De esta forma, en la transición hacia una economía competitiva baja en carbono, la rehabilitación energética del parque de edificios existente es una prioridad para la Unión Europea.

Sin embargo, a pesar de los mecanismos de ayuda que se han establecido para ello, la tasa de rehabilitación anual de edificios residenciales en Europa continua siendo reducida. Es necesario, por tanto, profundizar en los diferentes aspectos asociados al proceso de rehabilitación energética, para poder definir una planificación energética inteligente que permita incrementar la tasa actual de rehabilitación y el ahorro energético.

Asimismo, las autoridades locales constituyen un apoyo crucial para la implantación de políticas de eficiencia energética y, en este sentido, existe una tendencia creciente de adaptación de las herramientas de análisis energético a la escala urbana.

Con el fin de contribuir a esta materia, esta tesis profundiza en tres líneas de investigación: la caracterización del parque residencial actual, el análisis técnico-económico de medidas de eficiencia energética y el análisis del proceso de toma de decisión de los propietarios en relación con la rehabilitación de sus viviendas. El conocimiento desarrollado puede contribuir a la definición de políticas de eficiencia energética que garanticen una explotación eficiente de los recursos públicos.

Por un lado, la tesis presenta una metodología para la caracterización del consumo de calefacción residencial a nivel urbano. Esta metodología permite, desde una perspectiva cercana, clasificar el parque residencial existente en distintas categorías de viviendas, como base para el análisis de las políticas de eficiencia energética más adecuadas. La metodología se ha implementado en el parque residencial de Bilbao, identificando sus principales edificios arquetipos.

A partir de esta caracterización, y con el fin de identificar las áreas prioritarias en las que promover la eficiencia energética, a continuación se realiza el análisis técnico-económico de diversas medidas de rehabilitación energética en cada edificio arquetipo. Adaptando la metodología del nivel óptimo de rentabilidad definida por la Comisión Europea, se ha identificado el rango de eficiencia energética que es razonable promover en cada tipo de edificio y se ha evaluado el impacto que diferentes incentivos económicos orientados a su consecución tendrían en el período de amortización de la inversión.



No obstante, este análisis técnico-económico no tiene en cuenta la disparidad socioeconómica existente entre viviendas. En realidad, cada propietario puede valorar de forma diferente los beneficios de la rehabilitación energética y, en consecuencia, la disposición para llevarla a cabo puede diferir mucho entre casos.

En consecuencia, con el fin de complementar el análisis técnico-económico y analizar ese factor humano, por último se ha investigado el proceso de toma de decisión de los propietarios con relación a aislar térmicamente sus viviendas. Evaluando los factores que influyen en esta toma de decisión, se ha desarrollado un modelo de elección discreta. Su aplicación en este ámbito sigue siendo limitada en España, por lo que esta tesis pretende cubrir parcialmente este vacío.

Este modelo de elección discreta permite evaluar el impacto que diversos mecanismos de ayuda pueden tener en la probabilidad de rehabilitación energética de las distintas categorías de viviendas, contribuyendo así a una mejor asignación de los recursos públicos.

En resumen, el marco metodológico general desarrollado en esta tesis contribuye a formular políticas de rehabilitación energética desde una perspectiva cercana y proporciona información a las autoridades locales para ayudarlas en este proceso.

## Abstract

In order to address the challenges of the climate emergency and energy imports dependency, the European Union has ratified its commitment to move towards a climate-neutral economy by 2050. To achieve this objective, the slogan «first, energy efficiency» has become the guiding principle of European governance in climate and energy.

In Europe, the building sector is responsible for 40% of final energy consumption and causes 36% of CO<sub>2</sub> emissions. Indeed, the existing building stock is very old and has wide room for improvement in energy efficiency. Furthermore, the replacement rate of buildings is relatively low, so the impact of new, more efficient buildings on reducing energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions is limited. Thus, in the transition to a competitive low-carbon economy, the energy rehabilitation of the existing building stock is a priority for the European Union.

Nevertheless, despite the support mechanisms that have been put in place for it, the annual energy renovation rate of residential buildings in Europe remains scarce. It is therefore necessary to deepen the various aspects associated with the energy rehabilitation process, in order to set an intelligent energy planning that would allow to increase the current renovation rate and energy savings.

Local authorities are also a crucial support for the implementation of energy efficiency policies and, in this respect, there is a growing trend to adapt energy analysis tools to the urban scale.

Aiming to contribute to this field, this thesis deepens into three research lines: the characterization of the current residential stock, the techno-economic assessment of energy efficiency measures and the analysis of the homeowners' decision-making process in relation to the energy rehabilitation of their homes. The acquired knowledge can contribute to the definition of energy efficiency policies that ensure an efficient exploitation of public resources.

On the one hand, the thesis presents a methodology for the characterization of residential space heating energy consumption at city level. This methodology allows, from a close perspective, to classify the existing residential stock into different dwelling categories, which constitute a basis for the investigation of the most appropriate energy efficiency policies. The methodology has been implemented in the residential stock of Bilbao, in which the main building archetypes have been identified.

Based on this characterization, and in order to identify the priority targets in which to promote energy efficiency, afterwards a techno-economic assessment of various energy efficiency measures is carried out in each building archetype. By adapting the methodology of the cost-optimal level set by the European Commission, the suitable range of energy performance that is reasonable to promote in each building type is identified and the impact that different financial incentives aimed at achieving it would have on the investment's payback period is assessed.

However, this techno-economic assessment does not take into account the socioeconomic disparity between households. In fact, each homeowner might assess the benefits of energy rehabilitation differently and, as a result, the willingness to carry it out could differ greatly in each case.



Consequently, in order to complement the techno-economic assessment and to analyze this human factor, finally the homeowners' decision-making process in relation to the thermal insulation of their homes is investigated. By evaluating the factors that influence this decision-making, a discrete choice model is developed. In Spain, the application of discrete choice models is still limited in this specific field, so this thesis aims to partially fill this gap.

This discrete choice model allows assessing the impact that different support mechanisms may have on the probability of energy rehabilitation in the different dwelling categories, thus contributing to a better allocation of public resources.

In summary, the general methodological framework developed in this thesis contributes to designing energy rehabilitation policies from a close perspective and provides information to local authorities to help them in this process.



## Esker onak

Lehenbizi, nire tesi zuzendariei. Ivani, ikerketaren mundua ezagutzera emateagatik eta tesian zehar agertutako oztopoei aurre egiteko irtenbideak bilatzen laguntzeagatik. Luisi, zure aholku, zentzu eta gidagatik.

Petr eta Davidi, EHUko Ekonomia eta Enpresa Fakultatean emandako harreragatik, eta tesiaren hirugarren fasea burutzeko eskainitako laguntza eta prestasunagatik.

Enpresan izan ditudan nagusiei, arduraldi partzialean egindako tesi hau gauzatzeko emandako konfiantza eta malgutasunagatik, eta baita lankideei ere, zuen etengabeko sostengu eta eskuzabaltasunagatik.

Eskerrak bereziki lagunei, atsedena behar izan dudanean beti hor egoteagatik, alaitzeko prest, eta zuen etengabeko animo eta laguntzagatik. Mila esker tesia nirekin batera “pairatzeagatik”.

Azkenik, eskerrik handienak nire familiari. Amamari, gauza garrantzitsuenak zeintzuk diren ez ahaztea egiteagatik. Ama, aita eta anai-arrebei, osaba-izebei, emandako kemenagatik, uneoro laguntzeko prest egoteagatik eta erakutsitako pazientzagatik. Eta Marta, bide luze hau gertuen bizi izan duzuna. Mila esker, bihotzez, erdietsitako lorpen bakoitza nirekin ospatzeagatik eta momentu zailenetan emandako babesagatik.

Tesi hau zuentzako da.

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Bizitegi-parkeen birgaitze energetikorako ikuspegi  
integrala: Bilboko kasua**

## Aurkibidea

|   |    |
|---|----|
| Laburpena .....   | 3  |
| Resumen.....  | 5  |
| Abstract .....  | 7  |
| Esker onak .....  | 9  |
| Aurkibidea .....  | 11 |
| Irudien zerrenda.....   | 13 |
| Taulen zerrenda .....   | 15 |
| Glosarioa .....   | 17 |
| Lehenengo Atala: ikerketaren planteamendua eta garapena .....                   | 19 |
| 1. Sarrera.....   | 19 |
| 1.1 Testuingurua .....  | 19 |
| 1.1.1 Aurrekariak.....  | 19 |
| 1.1.2 Lege-esparrua.....  | 20 |
| 1.2 Tesiaren motibazioa eta ekarpena.....                                       | 23 |
| 1.3 Tesiaren egitura.....   | 25 |
| 2. Ikerketa hipotesia eta tesiaren helburuak .....                              | 27 |
| 2.1 Ikerketa hipotesia.....   | 27 |
| 2.2 Tesiaren helburuak.....   | 27 |
| 3. Esparru teorikoa eta metodologia .....                                       | 29 |
| 3.1 Esparru teorikoa .....  | 29 |
| 3.1.1 Eraikuntza parkearen karakterizazioa .....                                | 29 |
| 3.1.2 Energia-jardueraren kostu-maila optimoa .....                             | 31 |
| 3.1.3 Aukera diskretuko ereduak .....   | 37 |
| 3.2 Metodologia .....   | 41 |
| 3.2.1 Lehenengo fasea: eraikuntza parkearen karakterizazioa.....                | 41 |
| 3.2.2 Bigarren fasea: energia-jardueraren kostu-maila optimoaren kalkulua ..... | 58 |
| 3.2.3 Hirugarren fasea: aukera diskretuko ereduaren estimazioa .....            | 68 |
| 4. Emaitzak .....   | 73 |
| 4.1 Lehenengo fasearen emaitzak .....   | 73 |
| 4.2 Bigarren fasearen emaitzak.....   | 76 |
| 4.3 Hirugarren fasearen emaitzak.....   | 89 |
| 5. Erreferentzia iturriak.....  | 98 |



|  |     |
|--|-----|
| Bigarren Atala: ikerketaren ondorioak.....             | 107 |
| 6. Ondorioak eta etorkizunerako ikerketa-lerroak ..... | 107 |
| 6.1 Ondorioak.....                                     | 107 |
| 6.1.1 Lehenengo fasearen ondorioak.....                | 107 |
| 6.1.2 Bigarren fasearen ondorioak.....                 | 108 |
| 6.1.3 Hirugarren fasearen ondorioak.....               | 110 |
| 6.2 Etorkizunerako ikerketa-lerroak.....               | 112 |

## Eranskinak

I. Argitaratutako lanak

II. Bilbo hiriaren bizitegi-parkearen karakterizazioa

## Irudien zerrenda

|  |    |
|--|----|
| 1. Irudia: Espainiako etxebizitza-sektoreko energia-kontsumoaren bilakaera. ....   | 20 |
| 2. Irudia: tesi honetan jorratutako hiru ikerketa-ildoak. ....   | 24 |
| 3. Irudia: Kostu-optimizazioa eta kostu-eraginkortasunaren eskema. ....  | 32 |
| 4. Irudia: energia-jardueraren kostu-maila optimoak ebaluatzeko prozesua. ....   | 33 |
| 5. Irudia: kostu ezberdinen kategorizazioa. ....   | 35 |
| 6. Irudia: denboraren arabera kostuen irudikapena. ....  | 35 |
| 7. Irudia: metodologiako lehenengo fasearen aurkezpen orokorra. ....   | 42 |
| 8. Irudia: eraikin-arketipo bakoitzari forma eta jarraitasuna esleitzeko prozedura. ....   | 45 |
| 9. Irudia: energia-fakturetako kontsumo-datu historikoen grafikoa (adibidea). ....   | 49 |
| 10. Irudia: udako UBS kontsumoaren estimazioan oinarritutako datuen azterketa. ....  | 51 |
| 11. Irudia: etxe-erabileren arabera erregai kontsumoaren banaketan oinarritutako datuen azterketa. ....  | 52 |
| 12. Irudia: erregreasioan sartu beharreko datuaen prestaketa-prozesua. ....  | 54 |
| 13. Irudia: jasotako eraginkortasun energetikoaren etiketen adibidea. ....   | 55 |
| 14. Irudia: etiketatik lortutako balioetatik berokuntza-kontsumoak estimatzeko definitutako metodoa. ....  | 56 |
| 15. Irudia: etxeko biztanle kopuruaren arabera eguneko UBS per capita kontsumoa. ....  | 63 |
| 16. Irudia: DCEan erabilitako aukera-multzoen txartelen adibidea. ....   | 71 |
| 17. Irudia: eraikin-arketipoen urteko berokuntza-eskariak, eraikuntza-aldia eta hiri-morfologiaren arabera. ....                                     | 74 |
| 18. Irudia: berritze-pakete pasiboekin lortutako EP-eb eta KGen mapa. ....   | 77 |
| 19. Irudia: neurri-paketeek eragindako efektuen ikuspegi pribatu kualitatiboa, GN kontsumitzen duten EEtan. ....                                     | 78 |
| 20. Irudia: neurri-paketeek eragindako efektuen ikuspegi pribatu kualitatiboa, sistema termiko elektrikoak dituzten EEtan. ....                      | 78 |
| 21. Irudia: kostu-maila optimoekin lortuko litzatekeen EP-eb aurrezpenen banaketa. ....  | 81 |
| 22. Irudia: 14. EERI dagozkion hainbat berritze-paketeren KG banaketa. ....  | 82 |
| 23. Irudia: EE1 – GNrentzat lortutako KG kurba. ....   | 82 |
| 24. Irudia: EE5 - Erentzat lortutako KG kurba. ....  | 83 |
| 25. Irudia: birgaitze energetikoaren bidez lortu daitezkeen EP-eb aurrezki maximoak, horiekin lotutako KGaren igoeren arabera. ....                  | 84 |
| 26. Irudia: aurreztutako EP-eb unitate bakoitzeko beharrezkoa den KGren igoera, birgaitutako etxebizitza bakoitzeko EP-eb aurrezkiaren arabera. .... | 85 |



|   |    |
|---|----|
| 27. Irudia: kostu-maila optimo makroekonomikoak amortizazio-epe pribatu ezberdinekin lortzeko beharrezkoa izango litzatekeen diru-laguntza.....   | 87 |
| 28. Irudia: %2ko finantzazio-tasarekin EE bakoitzak behar duen diru-laguntzaren zatia, 15 urtetik beherako amortizazio-epea bermatzeko aldaera optimoetan. ....   | 88 |
| 29. Irudia: diru-laguntzen banaketa 15 urteko amortizazio-epearentzat.....  | 88 |
| 30. Irudia: Bilboko etxebizitzaren banaketa-funtzioa, fatxadak isolatzeko egin beharreko inbertsioaren arabera. WTP totala erakusten du, eta baina errenta baxuko etxeena ( $WTP_{eb}$ ) eta errenta ertain eta handikoena ere ( $WTP_{ea}$ ). .... | 94 |
| 31. Irudia: birgaitzeko probabilitatearen aldaketa diru-laguntzaren mailaren arabera. ....  | 95 |
| 32. Irudia: %60ko birgaitze-probabilitatera iristeko beharko lukeen diru-laguntza.....  | 96 |

## Taulen zerrenda

|   |    |
|---|----|
| 1. Taula: helburuen sailkapena artikuluen arabera. ....   | 27 |
| 2. Taula: bizitegi-sektore osoetako energia-kontsumoa modelizatzeko metodo bakoitzaren onurak eta ahuleziak. ....       | 31 |
| 3. Taula: ikuspegi bakoitzean kontuan hartutako kostu-elementuak.....   | 36 |
| 4. Taula: hiri-morfologia mota nagusien deskribapena. ....  | 46 |
| 5. Taula: erregai bakoitzaren konbertsio-faktoreak.....   | 56 |
| 6. Taula: banakako sistemen sasoiko batez besteko efizientziak. ....  | 57 |
| 7. Taula: Bilboko etxebizitza adierazgarri bakoitzaren berokuntza eta UBS ekoizpen-sistemen banaketa.....               | 61 |
| 8. Taula: kostu-maila optimoaren metodologia aplikatu zaien EEak.....   | 62 |
| 9. Taula: aztertutako EENen deskribapen orokorra. ....  | 64 |
| 10. Taula: EE bakoitzari aplikaturiko isolamendu lodiera-mailak eta birgaitutako fatxadaren U-balioak. ....             | 65 |
| 11. Taula: IL <sub>i</sub> -x isolamendu-maila bakoitzarekin simulatutako EEN pasiboen konbinazioak.....                | 65 |
| 12. Taula: simulatutako neurri pasibo eta sistemen konbinazioak.....  | 66 |
| 13. Taula: simulatutako eguzki-kolektore termikoen eta sistema fotovoltaikoen dimentsionamendua. ....                   | 67 |
| 14. Taula: EEN ezberdinentzako kontsideratutako bizitza-erabilgarria eta urteko mantentze-kostua.....                   | 67 |
| 15. Taula: DCEan erabilitako atributuak eta atributu-mailak. ....   | 69 |
| 16. Taula: laginaren ezaugarri sozioekonomikoen alderaketa EUSTATEk emandako Bizkaiko populazioaren banaketarekin. .... | 71 |
| 17. Taula: modelatutako eraikin-arketipoen urteko berokuntza-eskariak. ....   | 73 |
| 18. Taula: eraikuntza-aldiaren araberrako batez besteko berokuntza-eskariak.....  | 74 |
| 19. Taula: modelizatutako berokuntza-kontsumoaren alderaketa baliozkotze-datuekin.....                                  | 75 |
| 20. Taula: modelatutako berokuntza-eskarien alderaketa erregresioaren emaitzekin. ....                                  | 75 |
| 21. Taula: modelatutako bizitegi berokuntza-eskari agregatuaren alderaketa Bilboko datu historikoarekin. ....           | 76 |
| 22. Taula: GN kontsumitzen duten EEen kostu-maila optimoak. ....  | 79 |
| 23. Taula: sistema termiko elektrikoak dituzten EEen kostu-maila optimoak.....  | 80 |
| 24. Taula: agertoki desberdinetan balioetsitako batz besteko kostu-maila optimoko aldaerak. ....                        | 84 |
| 25. Taula: MXL ereduaren estimazioaren emaitza.....   | 90 |
| 26. Taula: aztertutako eraikin-arketipoen ezaugarri nagusiak. ....  | 95 |



27. Taula: belioetsitako probabilitate aldaketak, oinarritzko kasuarekiko, atributu-aldaketa bakoitzarentzako..... 97



## Glosarioa<sup>1</sup>

|        |   |
|--------|---|
| AIC    | Akaike information criterion  |
| ASC    | Alternative-specific constant   |
| BRL    | Base Refurbishment Level  |
| CNMC   | Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia  |
| CTE    | Código Técnico de Edificación   |
| DCE    | Discrete Choice Experiment  |
| E      | Emisibitatea  |
| EA     | Etxebizitza Adierazgarria   |
| EB     | Europako Batasuna   |
| EE     | Erreferentziatzko eraikina  |
| EEE    | Energiaren Euskal Erakundea   |
| EEN    | Eraginkortasun energetikoko neurria   |
| EEZ    | Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagiria   |
| EF     | Energia finala  |
| EIT    | Eraikinen Ikuskaritza Teknikoa  |
| EP     | Energia primarioa   |
| EP-eb  | Energia Primario ez-berriztagarria  |
| ERESEE | Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España |
| EUSTAT | Euskal Estatistika Erakundea  |
| GBA    | Goi bero-ahalmena   |
| GHG    | Greenhouse gas  |
| GN     | Gas naturala  |
| GTR    | Grupo de Trabajo sobre Rehabilitación   |
| IDAE   | Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía  |
| INE    | Instituto Nacional de Estadística   |
| KG     | Kostu Globala   |
| LCA    | Life cycle assessment   |
| LRT    | Likelihood ratio test   |
| MNL    | Multinomial logit   |

<sup>1</sup> Akronimo batzuk ingelesez mantendu dira, beren esparruan ezagunagoak baitira.



|       |   |
|-------|---|
| ML    | Maximum-likelihood                                    |
| MXL   | Mixed logit   |
| NZEB  | Nearly zero-energy building                           |
| PGL   | Petrolio Gas Likidotua                                |
| PNIEC | Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030  |
| RITE  | Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios |
| RUT   | Random Utility Theory                                 |
| SIC   | Schwarz information criterion                         |
| TEP   | Tokiko Ekintza Plana                                  |
| U     | Transmitantzia termikoa                               |
| UBS   | Ur Bero Sanitarioa                                    |
| WTP   | Willingness to pay                                    |

## Lehenengo Atala: ikerketaren planteamendua eta garapena

### 1. Sarrera

#### 1.1 Testuingurua

##### 1.1.1 Aurrekariak

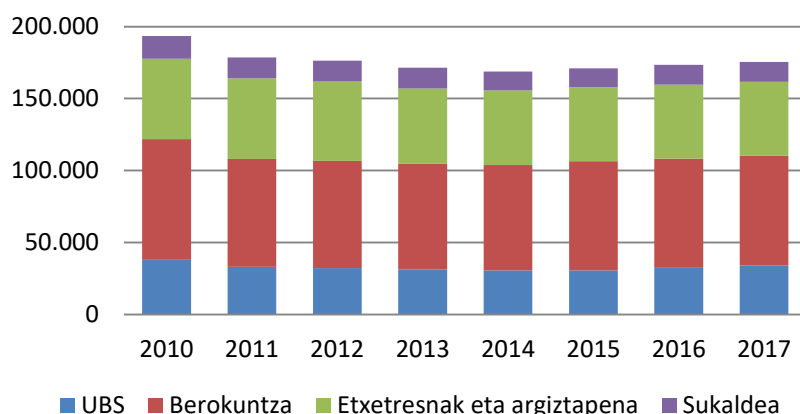
Atmosferako CO<sub>2</sub>-aren batez besteko kontzentrazioak 403 ppm-ak gainditu ditu jada, XIX. mendearen erdialdean baino %40 handiagoa izanik [1]. Aldi berean, ebidentzia zientifikoak erakutsi du gizakiak eragindako tenperatura globalaren igoera, industriaurreko mailarekiko, 1°C-tik gorakoa dela dagoeneko, eta 0,2°C handitzen ari dela hamarkada bakoitzeko [2]. Europako Batzordearen arabera, azken bi hamarkadetan Europan erregistratutako urterik beroenetako 18 izan ditugu [3]. Joera argia da: larrialdi klimatikoak berehalako ekintza eskatzen du.

Bestalde, Europar Batasunaren (EB) energia-inportazioekiko mendekotasuna, bereziki petrolio eta gas naturalarekiko, energia-horniduraren segurtasunarekin lotutako kezka politikoen oinarria da. 2019an, EBko energia-beharren %61 (Espainiaren kasuan %80) inportazioen bidez bete ziren [4], eta horrek agerian uzten du hirugarren herrialdeekiko duen zaugarritasun-maila. Datozen hamarkadetarako aurreikusitako energia-kontsumo globalaren igoerak, batez ere garapen-bidean dauden herrialdeen hazkunde ekonomikoak eta demografikoak bultzatuta [5], energia-baliabideen lehia areagotu besterik ez du egingo. EBk badaki hori, eta badaki *“Europar Batasunaren oparotasuna eta segurtasuna energia-hornidura egonkor eta ugariaren mende daudela”* [6].

Europako epe luzerako ikuspegi estrategikoak [3], EBk erronka horiei aurre egiteko duen politikaren oinarria dena, 2050ean klimatikoki neutroa den ekonomia baterantz jotzeko konpromisoa berretsi egin zuen. Horretarako, berotegi-efektuko gasen (GHG, ingelesez) emisioak %80-%95a murriztu behar dira, 1990eko datuekin alderatuta. Tarteko helburu gisa, 2030erako helburuen artean GHGen emisioak %40 murriztea, energia berriztagarrien kuota kontsumoaren %32 izatea eta eraginkortasun energetikoa %32,5ean hobetzea daude. Izan ere, aurreztearen bidez saihestutako energia-kontsumoa “energia-baliabide” garrantzitsua bihurtu da EBrentzat.

EBan eraikuntza-sektoreak GHG emisioen %36 sortzen du, eta azken energia-kontsumoaren %40aren erantzule da. Tasa altu horien arrazoietakoa bat EBko eraikinen %35ak 50 urte baino gehiago izatea da [7]. Europako egungo bizitegi-eraikin gehienak 1940 eta 1970 artean eraiki ziren [8]. Beraz, karbono gutxiko ekonomia lehiakor baterako trantsizioan, eraikuntzaren sektorea eraginkortasun energetikorako potentzial handiena duen sektoretako bat da.

Espainiari dagokionez, etxebizitza-sektorearen energia-kontsumoak joera lau bat erakusten du (1. Irudia), 2008ko krisiak eragindako geldialdia eta kontsumo globalaren murrizketa gorabehera. Etxebizitza-sektoreak Espainiako energia-kontsumo osoaren %17 hartzen duela kontuan hartuta (%25, energia elektrikoaren kontsumoa soilik kontuan hartuz gero), gutxiagotzeko erakutsi duen erresistentziak energia-eraginkortasuneko politikak diseinuan funtsezko sektorea bihurtzen du.



### 1. Irudia: Espainiako etxebizitza-sektoreko energia-kontsumoaren bilakaera (GWh) [9].

Bestalde, eraikinen errotazio-tasa nahiko txikia da, batez ere herrialde industrializatuetan [10] eta, hori dela eta, 2050ean existituko diren eraikinen %80 jadanik eraikita daudela estimatzen da [11]. Beraz, eraikin berriek energia-kontsumoaren eta GHG emisioen murrizketan izan dezaketen eragina mugatua da, ezinbestekoa bihurtuz egungo eraikin-parkearen eraginkortasun energetikoa hobetzea. Hau sustatzeko politikak ezarri diren arren, European eraikinen urteko berritze-tasak %0,4etik %1,2ra bitartekoa izaten jarraitzen du [12].

Egun, eraikin-parkearen birgaitze energetikoa lehentasun bat bilakatu da EBrentzat, funtsezkoa baita epe luzeko klima- eta energia-helburuak lortzeko.

#### 1.1.2 Lege-esparrua

Azken hamarraldian, eraikinen eraginkortasun energetiko handiagoa sustatzera bideratutako Europako lege-esparruak bi arau hauek izan ditu oinarri: 2010/31/EB Zuzentaraua [13], eraikinen eraginkortasun energetikoari buruzkoa, eta 2012/27/EB Zuzentaraua [14], eraginkortasun energetikoari buruzkoa.

2010/31/EB Zuzentarauak –2002/91/EB Zuzentaraua [15] moldatu egin zuena–, eraikinen eraginkortasun energetikoa kalkulatzeko esparru orokor bera sortu zuen EBko Estatu guztientzat. Halaber, besteak beste:

- Salgai edo alokagai jartzen diren etxebizitza guztietan eraginkortasun energetikoaren ziurtagiria (EEZ) izateko betekizuna ezarri zuen.
- Eraginkortasun energetikoaren kostu-maila optimoaren ikuspegia sartu zuen, hots, eraikinaren balio-bizitzaren zikloan kosturik txikiena dakarren esku-hartze energetikoaren maila. Era berean, EBko Estatuak beren kostu-maila optimoak aldizka kalkulatu eta jakinarazteko betebeharra ezarri zuen, esparru metodologiko konparatibo beraz baliatuta, emaitzen arabera zehazteko arautegi nazionalen indarrean dauden eraginkortasun energetikoaren gutxieneko betekizunak. Hortaz, ondoren, EBko Estatu guztientzako esparru metodologikoa garatu zen, Europako Batzordearen 244/2012 Erregelamendu Delegatuaren [16] eta horrekin batera doazen gidalerroen bidez [17].

- “Energia-kontsumo ia-nuluko eraikina” (*Nearly Zero Energy Building*, NZEB) kontzeptua definitu zuen, eta EBko Estatu bakoitzari eskatu zion hari loturiko energia primarioaren (EP) zenbakizko adierazlea zehazteko, ezaugarri nazionalen arabera. 2021eko urtarriletik aurrera, eraikin berriek baldintza hori bete behar dute.

Lehendik dauden eraikinetako etxebizitzak salgai edo alokagai jartzen direnean EEZ egin beharra 235/2013 EDaren bitartez [18] egokitu zitzaion Espainiako ordenamendu juridikoari, ziurtagiriak egiteko oinarrizko prozedura onartuz. Harrezkerotik egindako EEZk erabiltzeko aukera aztertzen du lan honek, simulazio-softwareren bidez eraikitako eraikinen eredu fisikoak baliozkotzeko.

Halaber, bizitegi-parkearen kostu-maila optimoaren kalkularen txostenak bidaltzen dizkio Espainiak EBri. Azken txostenak, 2018koak [19], Espainiako bizitegi-parkea familia bakarreko erreferentziatzko eraikin biren eta apartamentu-blokeen beste bi eraikinen bidez karakterizatu du, eta horien jarduera energetikoaren kostu-maila optimoak kalkulatu ditu. Nabarmentzekoa da erreferentziatzko eraikin-kopuru hain txikiaren erabilera, egungo bizitegi-parkearen tamaina handiarekin eta heterogeneotasunarekin alderatuta. Hortaz, tesi honek kostu-maila optimoak kalkulatzeko metodologia eskala txikiago batean aplikatzea proposatzen du, hirikoan, alegia. Horrela, nahiko uniformeak eta homogeenak diren eraikinen tipologiak arabera sailkatu daiteke bizitegi-parkea, eraikin ezberdinen arteko jarduera energetikoaren kostu-maila optimoen desberdintasuna ezagutu ahal izateko eta, eraikinak birgaituz gero, horiek NZEBen eraginkortasun energetikoaren maila lortzearen bideragarritasuna aztertzeko. Azken hau 2019ko abenduan zehaztu zen Eraikuntzaren Kode Teknikoan (CTE) [20].

Bestetik, 2012/27/EB Zuzentarauak eraginkortasun energetikoa sustatzeko neurrien esparru bera ezarri zuen Estatu guztientzat, EBk 2020rako eraginkortasun energetikoaren gainean zuen helburua betetzen zela ziurtatzeko eta ondoren hobekuntzak egiteko bidea prestatzeko. Neurri horien artean, eraikuntza-sektoreari dagokionez, hurrengo azpimarratu beharra dago: epe luzerako estrategia taxutzeko eskatzen zien EBko Estatuei, egungo bizitegi-parkea birgaitzeko inbertsioak mobilizatzeko.

Espainiak agindu hori bete egin du Espainiako Eraikuntza-sektoreko Birgaitze Energetikorako Epe Luzeko Estrategia (ERESEE) prestatuz. Estrategia hori 2014an zehaztu zen [21], eta hiru agertoki definitzen zituen 2014tik 2020ra bitartean birgaitze energetikorako: oinarrizko agertokia, eraikinen eraginkortasun energetikoa hobetzeko dirulaguntzak, aurretik hitzemandakoak, luzatzearen ondorio dena, eta 6 urte horietan, hurrenez hurren, 1,4 eta 2 milioi etxebizitzaren birgaitze energetikoa kontuan hartzen zuten agertoki ertain eta altuak.

Estrategia ezarri eta hurrengo urteetan etxebizitzak birgaitzeko obra-zuzendaritzako oniritzi-kopuruaren bilakaera oso ona izan bazen ere, bizitegi-parkea berritzeko tasa balio horietatik urrun dago oraindik Espainian. Egoera horren erakusgarri da azken urteetan ezarritako laguntza-programa nagusienetako batzuen esparruan energetikoki birgaitutako etxebizitzakopurua: PAREER-CRECE programak 42.000 etxebizitzaren eraginkortasun energetikoa hobetzea diruztatu zuen 2013-2016 denboraldian, eta horren jarraipenak, PAREER II programak, beste 30.000 etxebizitzatarako laguntza gehigarriak onartu zituen 2017tik 2020ko martxora bitartean [9].

Bien bitartean, Parisko Akordioaren konpromisoak betetze aldera eta munduko energia-trantsizioa lideratzen jarraitzeko, 2019an, EBk politika energetikoaren esparrua berraztertu zuen, eta neurri batzuk hartu zituen *Energia garbia europar guztientzat* izenburupean [22], besteak beste:

- 2018/844 (EB) Zuzentaraua [23], 2010/31/EB Zuzentaraua aldatu zuena, eraikinen eraginkortasun energetikoari buruzkoa. 2050ean baino lehen eraginkortasun energetiko handiko bizitegi-parke deskarbonizatuak lortzeko helburua ezarri zen, lehendik dauden eraikinak NZEB eraikin bilakatzea errazteko.
- 2018/2002 (EB) Zuzentaraua [24], 2012/27/EB Zuzentaraua aldatu zuena, eraginkortasun energetikoari buruzkoa. 2030erako eraginkortasun energetikoa gutxienez %32,5 handitzeko helburua ezarri zen, 2007ko ereduaren proiektioei zegokienez.
- 2018/1999 Erregelamendua [25], Energiaren Batasunaren eta Klimaren aldeko Ekintzaren gobernantzari buruzkoa, EBko Estatuak hurrengoak definitu beharra xedatu zuena:
  - Energia eta Klimaren 2021etik 2030erako Plan Nazional Integratua, hurrengo gaien gainean helburuak eta politikak aurkezteko: deskarbonizazioa, eraginkortasun energetikoa, energia-segurtasuna, energiaren barne-merkatua eta ikerketa, berrikuntza eta lehiakortasuna.
  - Epe Luzerako Estrategia GHGen isuriak murrizteko, gutxienez 30 urteren buruan.

Oraintsu, 2018/1999 Erregelamendua betetze aldera, Espainiako Gobernuak ezarritako Epe Luzerako Estrategia [26] eta Energia eta Klimaren Plan Nazional Integratua (PNIEC [27]) koherentziaz taxutu dira, epe ertaina (2030) eta epe luzea (2050) ikuspegi estrategiko bakarrean integratuz, neutraltasun klimatikorantz aurrera egiteko. Hauxe da ibilbide-orria datorren hamarraldirako:

- EBk onartutakoaren arabera, 2030erako eraginkortasun energetikoa %32,5 handitzeko helburua bere egitea (%39,5 handitzea espero da).
- Bizitegi-parkea 2050erako deskarbonizatzeko helburua bere egitea, 2030erako etxeko energia 26.394 GWh aurrezteko epe ertainerako helburua zehaztuta.

2030erako aurrezki-helburu hori etxeko berokuntza eta ur bero sanitarioaren (UBS) erabilera biltzen da batik bat, eta aurrez ikusten denez, etxeko aurrezki energetiko guztiaren %55 eta %28 izango lirake, hurrenez hurren. Aurrezki hori lortzeko bidea Espainiako ERESEE strategiaren azken eguneraketan xehatu da, eta horrek adierazi duen bezala, ez da nahikoa etxeko berokuntza eta UBS ekipamendu eta instalazioetan bakarrik esku hartzea: nahitaezkoa da, gainera, 2020-2030 denboraldian gutxienez 1.200.000 etxebizitzaren inguratzaile termikoaren eraginkortasun energetikoa hobetzea. Hori lortzeko, urtean 30.000 etxebizitza energetikoki birgaitzetik, 2030ean 210.000 eta 300.000 artean birgaitzera igaro beharko da.

Halaber, 2020ean Europako Batzordeak Europako Itun Berdea onartu zuen [12], hots, ekimen politiko multzo bat, 2030ean GHGak %55 murrizteko eta 2050ean neutraltasun klimatikoa

lortzeko helburu nagusiekin. 2021eko uztailean, xede hauek lege bihurtu ziren Europako Klima Legearen bidez [28].

Europako Itun Berdeak klima eta energiaren arloko politikaren oinarri gisa definitu zuen efizientzia energetikoa, ahaleginak areagotu beharreko eremuetako bat eraikuntza-sektorea izanik. Horrela, Itun Berdearen esparruan, 2020ko urrian Europako Batzordeak Berritze Olatuaren estrategia aurkeztu zuen [29], eraikinen birgaitze energetikoa sustatzeko. Honen helburua da, gutxienez, eraikinen urteko berritze-tasa bikoiztea 2030erako.

Egun, eraikuntzaren sektorea eskulanean intentsiboa dela eta tokiko enpresetan oinarrituta dagoela kontsideratuz, eraikinen birgaitze energetikoak funtsezko ekarpena izan dezake COVID-19 pandemia osteko susperraldi ekonomikoan. Alde horretatik, *NextGenerationEU* berreskuratzeko-funtsak eta urte anitzeko finantza-esparruak, birgaitze hauek aktibatzen erabil daitezkeen aurrekaririk gabeko baliabide-bolumena eskainiko dute.

Aldi berean, Berritze Olatuaren estrategiaren esparruan, funtsezko ekimenetako bat Eraikinen Efizientzia Energetikoaren Zuzentarauaren berrikusketa da. 2021eko abenduan Europako Batzordeak proposaturiko aldaketek [30], besteak beste, jarduera energetiko minimozko arauak pixkanaka sartzera aurreikusten dute, jarduera txarreko eraikinen birgaitzea bultzatzeko. Proposamen horrek 2030rako eraikin-sektorearen emisioak %60 murriztea du helburu, 2015ekoekin konparatuz.

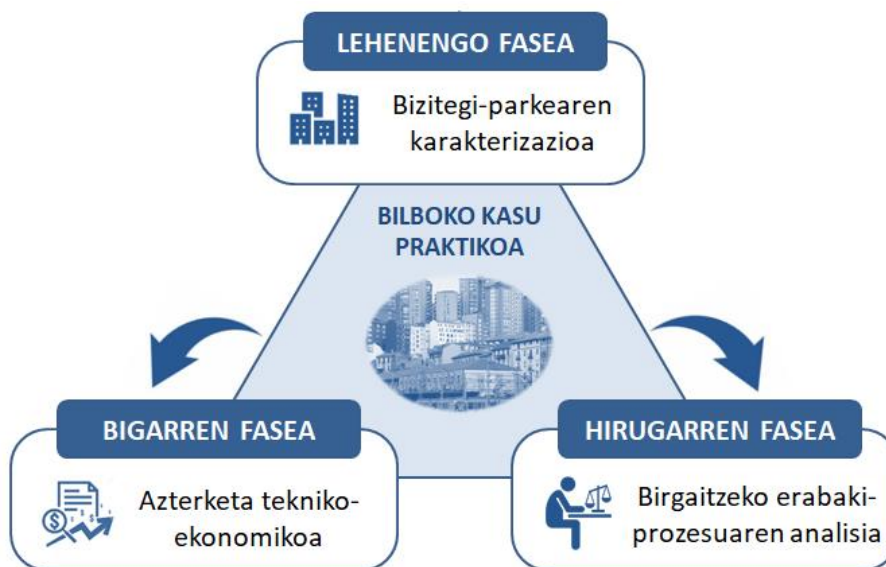
## 1.2 Tesiaren motibazioa eta ekarpena

Bizitegi-sektoreko energia-kontsumoa eta CO<sub>2</sub> emisioak murrizteko eta, aldi berean, hazkunde ekonomikoa sustatu eta ongizatea hobetzeko, energia-plangintza adimentsua beharrezkoa da. Gaur egun, energia aurrezteko politikak ikuspegi orokor batean oinarrituta daude, Estatu-mailako politika amankomuna izan ohi delako.

Alde horretatik, tokiko agintariek laguntza handia izan dezakete eraginkortasun energetikoko politikak ezartzeko. Hala, Europako Batzordeak sustatutako ekimenen artean Alkateen Ituna dago, EBko klima- eta energia-helburuak aplikatzeko konpromisoa hartu duten milaka udal-gobernu biltzen dituen [31]. Prozesu horretan tokiko agintariei laguntzeko, gero eta joera handiagoa dago modelizazio energetikoko tresnak hiri-mailara egokitzeko.

Eremu horretan laguntzeko asmoz, tesi honek hiru ikerketa-ildotan sakontzen du, 2. Irudian adierazten direnak. Ildo horietako bakoitzak, tesi honek aurkezten duen metodologiaren fase bat osatzen du.

**Lehenengo faseak**, hiri-mailako bizitegi berokuntza-kontsumoa karakterizatzeko metodologia bat aurkezten du. Metodologia horrek, hurbileko ikuspegi baten bidez, egungo bizitegi-parkea etxebizitza-kategoria ezberdinetan sailkatzea baimentzen du, energia-eraginkortasuneko politika egokienak ikertzeko oinarri gisa. Hain zuzen ere, bigarren eta hirugarren faseetan burututako azterketak karakterizazio honen emaitzetan oinarritzen dira. Proposaturiko metodologia Bilboko bizitegi-parkean implementatu da, eraikin-arketipo nagusiak identifikatuz.



## 2. Irudia: tesi honetan jorratutako hiru ikerketa-ildoak.

Karakterizazio horretan oinarrituta, eta eraginkortasun energetikoa sustatu beharreko lehentasunezko eremuak identifikatzeko asmoz, **bigarren fasean** birgaitze energetikoko neurri ezberdinen azterketa tekniko-ekonomikoa burutu da. Europako Batzordeak zehaztutako kostumaila optimoaren metodologia egokituz, eraikin mota bakoitzean sustatu litekeen energia-jarduera tarte egokia identifikatu eta hori lortzen lagun litzaken pizgarri ekonomikoek amortizazio-epetan izango luketen eragina ebaluatu da.

Hala ere, analisi tekniko-ekonomiko horrek ez ditu etxebizitzaren arteko desberdintasun sozioekonomikoak kontutan hartzen. Izan ere, etxejabe bakoitzak modu desberdinean balora ditzake birgaitze energetikoak dakartzan onurak eta, ondorioz, birgaitze hori aurrera eramateko prestasuna asko alda liteke kasu batetik bestera.

Beraz, bigarren fasearen azterketa osatzeko eta giza faktore hori aztertzeko, **hirugarren fasean** etxejabeek beren fatxadak termikoki isolatzeko erabakia hartzeko prozesua ikertu da. Azken hau baldintzatzen duten faktoreak ebaluatuz, aukera diskretuko eredu bat garatu da, zeinaren aplikazioa Espainian oraindik ere mugatua den arlo espezifiko honetan. Tesi honek hutsune hori bete nahi du hein batean.

Garatutako aukera diskretuko ereduak, hainbat laguntza-mekanismok fatxaden birgaitze energetikoaren probabilitatean izan ditzaketen eragina ebaluatzeko aukera ematen du. Etxebizitza-kategoria bakoitzean pizgarri ezberdinek izan dezaketen eraginkortasuna balioestean, finantza-baliabide publikoak ahalik eta hobekien esleitzen lagun dezake.

Bestalde, tesi honek bi eremu konbinatu ditu: modelizazio-eremua eta eremu esperimentalak. Alde batetik, hainbat software erabili dira analitikoki eredu ezberdinak eraikitzeko, hala nola DesignBuilder [32], Matlab [33], SAM [34] eta R [35]. Bestetik, modelizazio-eremu hori landa-ikerketen bidez bildutako datuekin elikatu eta balioztatu da uneoro, ereduak errealitatea fidelki adierazten dutela bermatuz.

Laburbilduz, tesi honetan garatutako metodologiak eraginkortasun energetikoko politikak formulatzeko informazioa ematen du, laguntza-mekanismok ezberdinek birgaitze energetikoko



inbertsio pribatuen sustapenean izan ditzaketen eragina iragarri. Azken buruan, burututako ikerketaren jomuga gaur egungo eraikinen energia-aurrezkia eta birgaitze-tasa areagotzea izan da.

### 1.3 Tesiaren egitura

Tesi hau artikulu bildumaren bidez aurkeztutako lana da eta argitaratutako hurrengo hiru artikuluek osatzen dute.

1. FERNANDEZ, J.; DEL PORTILLO, L.; FLORES, I. *A novel residential heating consumption characterization approach at city level from available public data: Description and case study*, Energy and Buildings, 2020, vol. 221, 110082.
2. FERNANDEZ, J.; FLORES, I.; DEL PORTILLO, L. *Identification of cost-optimal levels for energy refurbishment of a residential building stock under different scenarios: Application at the urban scale*, Energy & Buildings, 2021, vol. 240, 110880.
3. FERNANDEZ, J.; FLORES, I.; DEL PORTILLO, L.; MARIEL, P.; HOYOS, D. *Accounting for homeowners' decisions to insulate: A discrete choice model approach in Spain*, Energy & Buildings, 2022, vol. 273, 112417.

Artikulu hauek I. Eranskinean agertzen dira.

Artikulu bakoitza 2. Irudiaren ikerketa-ildo edo fase bati dagokio, eta horretan garatutako ikerketa aurkezten du. Hala, artikulu bakoitzak deskribatzen dituen egungo egoeraren analisia, metodologia, emaitza eta ondorioak, guztiak batera, auto-esplikatzaileraren unitate bat osatzen dute.

Idazlan honek, batez ere, artikulu horiek osatzea du helburu, burututako ikerketaren haria aurkeztuz. Halaber,

- Esparru teoriko eta metodologiaren deskribapena hedatzen du, artikuluen ohiko luzerak ez baitu horretan sakontzea baimentzen.
- Lehenengo fasean garatutako metodologiaren inplementazioan, hots, Bilboko bizitegi-parkearen karakterizazioan, sakontzen du. Inplementazio hau II. Eranskinean aurkezten da.

Tesia sei kapitulutan banatzen da. 1. kapituluak bizitegi-sektorearen energia-kontsumoa murriztearen garrantzia deskribatzen du, eta hori lortzeko EBk azken hamarkadan garatutako lege-esparrua. Halaber, tesiaren motibazioa eta ekarpena aurkezten ditu, eta bere egitura deskribatzen du.

2. kapituluan ikerketaren hipotesia eta tesiaren helburuak agertzen dira, horietako bakoitza zein artikulutan landu den laburbilduz.

Esparru teorikoa eta metodologia 3. kapituluan lantzen dira. 3.1.1, 3.1.2 eta 3.1.3 atalek ikerketa-ildo edo fase bakoitzaren oinarri teorikoak laburbiltzen dituzte eta, ondoren, horietako bakoitzean jorratutako metodologian 3.2.1, 3.2.2 eta 3.2.3 ataletan sakontzen da, hurrenez hurren.

Metodologia osoa Bilbo hiriaren bizitegi-parkeari aplikatu zaio. Hala, balioetsitako emaitzak, eta horiei buruzko eztabaida, 4. kapituluan aurkezten dira.

Halaber, idazlan honetan zehar erabilitako erreferentzia iturriak 5. kapituluan adierazten dira. Horietaz gain, artikuluko bakoitzak horretan erabilitako beste batzuk adierazten ditu ere.

Azkenik, 6. kapituluak tesiaren ondorio eta ekarpen nagusiak laburbiltzen ditu, eta baita etorkizunerako ikerketa-lerroak ere.

Esandakoak esanda, bi modutan burutu daiteke tesiaren irakurketa:

- Fase metodologikoen arabera, idazlaneko kapituluaren ordenean; hau da, esparru teoriko, metodologia, emaitzak eta ondorioen egiturarekin, atal horietako bakoitzean hiru ikerketa-ildoak jarraian aurkezten direlarik.
- Ikerketa-ildoak bereiziz, eta bakoitzaren esparru teorikoa, metodologia, emaitzak eta ondorioak jarraian irakurriz. Horrela, adibidez, lehenengo ikerketa-ildoaren garapena 3.1.1, 3.2.1, 4.1 eta 6.1 ataletan aurkituko litzateke.

## 2. Ikerketa hipotesia eta tesiaren helburuak

### 2.1 Ikerketa hipotesia

Tesiaren motibazioko atalean azaldutakoaren arabera, tesi honetan frogatu nahi den hipotesia horrela laburbil daiteke:

*Bizitegi-eraikinen modelizazio energetikoa, birgaitze neurriekin lotutako alderdi tekniko-ekonomikoaren eta giza portaeraren azterketekin konbina daiteke, eraginkortasun energetikoa sustatzeko agertoki ezberdinen eragina balioesteko.*

*Ikuspegi integral horrekin erdietsitako emaitzek informazio garrantzitsua eman dezakete tokiko agintariak birgaitze energetikoko politikak ezartzen laguntzeko.*

### 2.2 Tesiaren helburuak

Tesi honen helburu nagusia bizitegi-eraikinen birgaitze energetikoa era integralean aztertzea izan da, prozesu horren alderdi ezberdinak bildu eta erlazionatzen dituen esparru orokor bat eratuz.

Garatutako ezagutza eraginkortasun energetikoko politikak definitzen laguntzera bideratuta dago, finantza-baliabide publikoen ustiapen eraginkorra lortzeko.

Helburu nagusia kontuan hartuta, helburu zehatzak hurrengoak izan dira:

1. Bizitegi-parkeen berokuntza-eskaria fidelki karakterizatzeko metodologia bat garatzea, hiri-mailari egokituta eta egungo metodoen ahuleziak gainditzera bideratuta dagoena.
2. Metodologia horren bideragarritasuna erakustea, Bilboko bizitegi-parkeari aplikatuz.
3. Gaur egungo energia-kontsumoa eta CO<sub>2</sub> emisioak murrizteko potentziala hurbileko ikuspegi batetik kuantifikatzea, behetik gorako prozesu bat jarraituz.
4. Eraginkortasun energetikoko maila optimoak hiri eskalan identifikatzea, bizitegi-parkearen heterogeneotasuna atzemateko eta Estatu mailan adierazitakoekin egon daitezken aldeak frogatzeko.
5. Etxejabeek beren etxebizitzak birgaitzeko duten alde-aurretiko jarrera aztertzea, eta baita erabaki hori hartzeko prozesuan eragiten duten faktoreak ere.
6. Finantza-pizgarri ezberdinek erabaki hori baldintzatu dezaketen neurria estimatzea, etxebizitzaren ezaugarrien arabera.

1. Taulak helburu bakoitza zein artikulutan landu den laburbiltzen du.

1. Taula: helburuen sailkapena artikuluen arabera.

| Helburu zehatza | Artikulua    |
|-----------------|--------------|
| 1               | 1. artikulua |
| 2               |              |
| 3               | 2. artikulua |



|   |              |
|---|--------------|
| 4 |              |
| 5 | 3. artikulua |
| 6 |              |

### 3. Esparru teorikoa eta metodologia

#### 3.1 Esparru teorikoa

##### 3.1.1 Eraikuntza parkearen karakterizazioa

Eraginkortasun energetikoko politikak definitzeko, funtsezkoa da lehenik eta behin eraikin-parkearen energia-kontsumoaren banaketa modu fidagarrian karakterizatzea. Horrela, eraikin-parkearen ereduaren garapena garrantzitsua da, alde batetik, eredu horiek egungo energia-kontsumoari buruzko informazio kuantitatiboa eskaintzen dutelako eta, bestetik, politika-neurri ezberdinek eragin dezaketen energia aurrezpena aurreikustea ahalbidetzen dutelako.

Bizitegi-sektore osoetako energia-kontsumoa modelizatzerakoan, bi ikuspegi nagusi bereizten dira: goitik beherakoa eta behetik gorakoa [36] [37]. Terminologiak erabilitako datu-sarrerak duten mailari - bizitegi-sektore osoarekiko - egiten dio erreferentzia. Beraz, teknika bakoitza sarrerako informazio mota desberdinetan oinarritzen da eta, halaber, aplikazio ezberdineko emaitzak ematen ditu.

Goitik beherako metodoek energia-sarbegi gisa hartzen dute bizitegi-sektore guztia eta, energia-kontsumo historikoan oinarrituz, kontsumoan influentzia izan dezaketen hainbat faktoreen eragina aztertzen dute; hala nola, adierazle makroekonomikoak (barne-produktu gordina, enplegu-tasak, prezio-indizeak, etab.), baldintza klimatikoak, aparatuen jabetza-estimazioak [36].

Hala ere, metodo hauek ez dituzte energia kontsumoan eragina duten banakako osagai fisikoak esplizituki modelatzen eta, beraz, ez dira gai teknologia-aldaketen eragina xehetasunez atzemateko, ezta teknologia ezberdinekin lotutako politikak aztertzeko ere.

Bestetik, behetik gorako metodoak osagai banatuen datuetatik abiatzen dira, desagregazio-maila era askotakoa izan daitekeelarik: azken energia-erabilerak, etxebizitza indibidualak edota etxebizitza taldeak. Ondoren, lortutako emaitzak agregatu egiten dira, osagai bakoitzari dagokion pisuaren arabera, eraikin-parke osoaren energia kontsumoa adierazteko. Halaber, sarrerako datuen arabera 2 motatako behetik gorako metodoak daude:

- Metodo estatistikoak, datu historikoetan eta euren erlazioen azterketa estatistikoan oinarritzen direnak. Hainbat teknika existitzen diren arren, behetik gorako metodo estatistikoaren artean erregresio metodoak dira nagusi.

Neurtutako energia-kontsumo datu errealean oinarritzen direnez, metodo hauen abantaila nagusia zorizko izaera duten giza portaerek energia-kontsumoan duten eragina barneratzeko gaitasuna da [38]. Hori dela eta, euren erabilera interesgarria da ingeniari-tza-metodoetan oinarritutako ereduak kalibratu eta baliozkotzeko.

Hala ere, metodo estatistikoek ez dute xehetasun ezta malgutasun handirik eskaintzen, eta, beraz, ahalmen mugatua dute energia-eraginkortasun neurri potentzialen eragina ebaluatzeko.

- Ingeniari-tza-metodoak, zeinen funtsa eraikinen fisikan oinarritutako kalkuluak dira. Hori dela eta, bizitegi-sektoreko energia kontsumoa kalkulatzeko gai diren metodo bakarrak dira, informazio historikoaren beharrik gabe.

Ingeniaritza-metodoak hiru teknika nagusitan sailka daitezke; hain zuzen ere distribuzioetan, arketipoetan eta laginetan oinarritutakoak. Euren artean, eraikin arketipoak dira erabilienak. Azken hauek eraikin adierazgarri (arketipo) multzo ezberdinetan sailkatzen dute etxebizitza-parkea, hainbat irizpideren arabera: ezaugarri geometrikoak, eraikuntzaren ezaugarriak, erabilitako sistema aktiboak, etab. Arketipo bakoitzari dagokion energia kontsumoa kalkulatu ondoren agregatu egiten da, arketipo bakoitzaren pisuaren arabera, bizitegi-sektore osoko kontsumoa lortzeko.

Metodo hauek esplizituki kalkulatzen dute, erlazio fisiko eta termodinamikoetan oinarritutako ereduak eraikiz, azken energia-erabilera bakoitzari dagokion energia-eskaera. Beraz, energia aurrezpen potentzial nagusia duten arloak identifikatzeko gai dira eta, aldi berean, metodo egokienak dira teknologia ezberdinek eta neurri politikoek CO<sub>2</sub> isurien murrizketan izan dezaketen inpaktuak aztertzeko [39].

Konplexutasun eta desagregazio-maila ezberdineko eredu ugari daude, euren emaitzen aplikagarritasuna ezberdina izan daitekeelarik. Adibidez, eredu jakin baten bereizmena egokia izan liteke maila nazionaleko iragarpenetarako, baina ez, ordea, eskala espazial finago baterako, hala nola udal-mailarako. Oro har, eredu baten desagregazio-maila zenbat eta handiagoa izan, orduan eta emaitza zehatzagoak bueltatuko ditu energia-eraginkortasun neurri ezberdinak konparatzean.

Hala ere, metodo hauen eragozpen nagusia osagai desagregatu bakoitzaren zehaztapenak eskatzen dituen datu enpiriko ugariaren beharra da. Eskuragarri dagoen datu kopuruak edo, zehazkiago, datu faltak, baldintzatzen baitu maiz ereduaren egitura. Ereduak eraikitze nahikoa laguntza-datu ez dagoenean eta suposatze asko egin behar direnean, ereduak askatasun-gradu gehiegi izan ditzake eta, beraz, bere iragarpenetan fidagarritasuna galtzeko arriskua.

Halaber, metodo hauen beste ahulezi nagusia modelizatutako eraikinen biztanleen portaera energetikoaren suposizioetan datza, zeinak zorizko izaera duten portaera errealetatik aldentzeko arriskua duen.

2. Taulak aurkeztutako metodo bakoitzaren onurak eta ahuleziak laburbiltzen ditu. Garatutako metodologiak behetik gorako ingeniaritza-metodo batean oinarritzen da, eraikuntza-parke osoa adierazten duten eraikin-arketipoen ereduak eraiki eta baliozkotzea ahalbidetzen duena. Halaber, metodologia bereziki bideratuta dago metodo hauen ohiko eragozpenak gainditzera, hala nola, sarrera-informazio ugariaren beharra eta giza portaera atzemateko zailtasuna, eraikitzen diren ereduaren sinesgarritasunean eragina izan dezaketenak. Hala, helburua oinarri fidagarri bat erdiestea da, eraginkortasun energetikoko neurriak eta politikak ebaluatzeko tresna gisa.

2. Taula: bizitegi-sektore osoetako energia-kontsumoa modelizatzeko metodo bakoitzaren onurak eta ahuleziak [37].

|                    | Goitik beherako metodoak  | Behetik gorako metodo estatistikoak  | Behetik gorako ingeniari-tza metodoak  |
|--------------------|---|--|--|
| <b>Onurak</b>      | Energia sektorearen eta ekonomiaren erlazioa aztertzea                                    | Giza-portaera energetikoaren eragina atzemateko gai izatea                   | Egungo eta etorkizuneko teknologiak xehetasunez deskribatzeko gai izatea                           |
|                    | Deskribapen teknologiko xeheak ekiditea   | Garatzeko eta erabiltzeko errazak izatea                                     | Eraginkortasun energetikoko neurri ezberdinen eragina estimatzeko gai izatea                       |
|                    | Eskuragarri daude datu ekonomiko agregatuak erabiltzea                                    | Xehetasun handiko daturik behar ez izatea                                    | Energia eskaria asetzeko beharrezkoa den teknologia konbinazio egokiena identifikatzeko gai izatea |
| <b>Eragozpenak</b> | Energia-ekonomia erlazio historikoan oinarritzen dira, etorkizuneko bilakaera iragartzeko | Datu historikoetan oinarritzen dira, etorkizuneko bilakaera iragartzeko      | Giza-portaera energetikoaren eragina atzemateko ezintasuna   |
|                    | Teknologia ezberdinekin lotutako politikak aztertzeko ezintasuna                          | Lagin handiak behar izatea   | Datu kopuru handiaren beharra  |
|                    | Merkatu efizienteak kontsideratzea, "efizientzia hutsune" gabekoak                        | Eraginkortasun energetikoko neurri ezberdinen eragina estimatzeko ezintasuna | Energia eta makroekonomiaren arteko erlazioa kontuan ez izatea                                     |

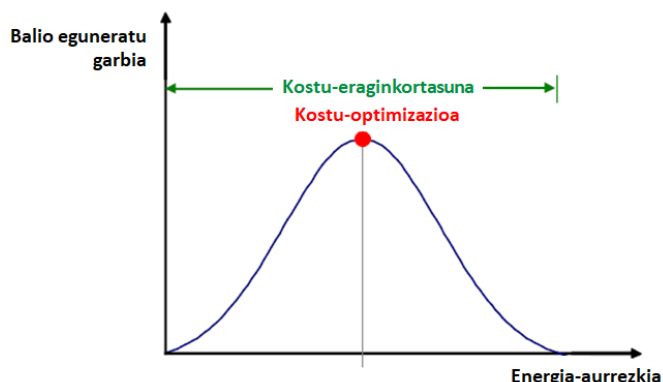
### 3.1.2 Energia-jardueraren kostu-maila optimoa

Lehen aldiz, 2010/31/EB Zuzentarauak [13] esparru bat definitu zuen, eraikinen energia-jarduera epe luzera hobetzeko baldintzak sortu zituen. Zuzentarauaren arabera, aurrerantzean estatu kideek eraikinentzako energia-jardueraren gutxieneko eskakizunak kostu-maila optimoa lortzeko asmoz ezarri behar dituztela, kalkulu-metodologia harmonizatu bat aplikatuz. Hala, Europako Batzordeak 244/2012 Erregelamendu Delegatuaren [16] garatu zuen kostu-maila optimoa kalkulatzeko metodologia. Estatu kideek metodologia hau aplikatu eta lortutako kostu-maila optimoak eraikuntzako arau nazionaletan ezarritako energia-jardueraren eskakizunekin alderatu behar dituzte, Europako Batzordeari aldizka aurkeztu beharreko txostenetan.

Funtsean, kostu-maila optimoa kalkulatzeko metodologia epe luzeko analisi bat da, eraikinak zaharberritzeko hainbat aukeraren errentagarritasunak alderatzen dituena bakoitzarekin aurreztuko litzatekeen energiaren arabera. Horrela, energia-eraginkortasunerako neurrien sustapena ez litzateke soilik euren energia-aurrezkian oinarritu behar, baizik eta bizi-ziklo osoaren kostuetan ere. Ikuspegi honek energia-jardueraren eskakizunak helburu ekonomikoekin lotu zituen lehen aldiz, eraikinen kostu ekonomikoak kontuan hartzeko beharra erantsiz energia-jarduera ebaluatzean. Beraz, GHGen isuriak murriztearen lehen mailako ingurumen-helburua lortzen laguntzea du helburu eta, aldi berean, eraikin baten bizi-zikloaren kostuak txikiagotzea.

Kostu-eraginkortasunaren eta kostu-optimizazioaren kontzeptuak erlazionatuta daude baina desberdinak dira. Kostu-optimizazioa kostu-eraginkortasunaren kasu berezia da. Birgaitze energetikoko neurri bat errentagarria da baldin eta eskatzen duen inbertsioa bere bizi-zikloan zehar eragindako energia aurrezkiaren kostua baino txikiagoa den. Beraz, bere balio eguneratu garbia positiboa bada, birgaitze neurria errentagarria da. Neurri errentagarrien artean, kostu-maila optimoari dagokiona balio eguneratu garbia maximizatzen duena da, hau da, bizi-

zirkloaren zeharreko kostua txikiagotzen duena. Hurrengo irudiak bi kontzeptuen arteko harremana erakusten du.



3. Irudia: Kostu-optimizazioa eta kostu-eraginkortasunaren eskema [40].

Ikuspegi ekonomiko honek ingurumen-ikuspegia bigarren maila batean utz dezakeen zalantza sorrarazten du. Bestela esanda, bilatutako kostuen optimizazioak, benetan, epe-luzeko ingurumen-helburu nagusia lortzea baimenduko duen, CO<sub>2</sub>-ren emisioak behar bezain beste murriztuz. Ez delako ahaztu behar kostuen optimizazioa ez dela, berez, EBren epe luzeko estrategiaren azken helburua eta, beraz, kostuak kontuan hartzeak ez luke etorkizunerako ingurumen-helburuak alde batera uztea eragin behar.

Edonola ere, kostu-optimoaren metodologia esparru baldintzak hobetzeko tresna bezala hartu behar da, gaur egun indarrean dauden energia-eskakizunak aldatu eta epe-luzeko ingurumen-helburuak lortzera bideratzeko. Hain zuzen ere, estatu kideek egindako kostu-optimoen lehenengo kalkuluek erakutsi zuten moduan, EBko herrialdeen erdietan, gutxi gorabehera, alde nabarmena existitzen den kostu-maila optimoen eta indarrean zeuden energia-eskakizunen artean [41]. Gauza bera ondorioztatu zuten [42]-ek, kostu-maila optimoei lotutako energia primarioak indarrean dauden estandar nazionalak baino nabarmen txikiagoak direla frogatuz.

Halaber, kostu-optimoen ebaluazioen emaitzak lagungarriak izan daitezke eraikinen birgaitze energetikoak sustatzeko politikak garatzen dituzten legegileentzat, diru-laguntzak, interes-tasa murriztuak eta abar ezartzerako orduan.

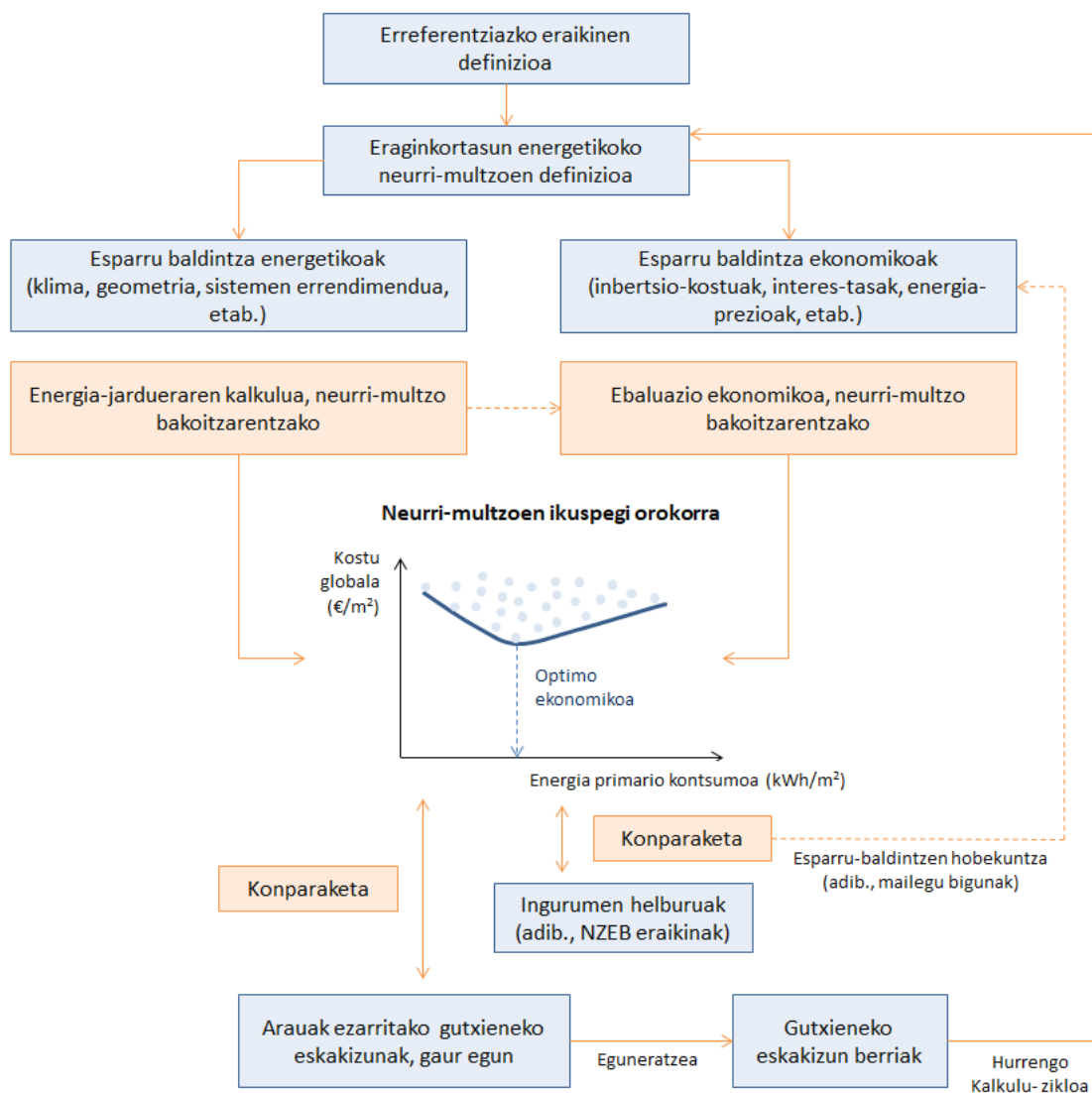
### 3.1.2.1 Metodologiaren ikuspegi orokorra

4. Irudia bizitegi-sektore bateko energia-jardueraren kostu-maila optimoak ebaluatzeko prozesu osoa deskribatzen du. Prozesuaren abiapuntua eraikin parkea ordezkatzan duten erreferentziako eraikin multzoa definitzea da. Halaber, energia-eraginkortasuneko neurrien definizioa metodologiaren funtsezko zatia da, ebaluazioaren benetako irismena ezartzen baitu. Neurri-pakete posibleak ere bildu behar dira, hau da, erreferentziako eraikinetan aplikatu beharreko energia-eraginkortasuneko neurrien konbinazioak.

Ondoren, kalkulu-etapa bi zatitan bereizten da, erreferentziako eraikin eta neurri-pakete konbinazio bakoitzarentzako: energia-jardueraren kalkulua eta errentagarritasun ekonomikoaren kalkulua. Lehen zatiaren helburua energia primarioaren urteko kontsumoa zenbatestea da. Bigarren zatiaren kalkulua lehenengo zatiaren emaitzen bidez elikatzen da.



2010/31/EB Zuzentarauaren arabera, energia-jardueraren ebaluazioan sartu beharreko azken energia-erabilerak hurrengoak dira: berokuntza, hozketa, aireztapena, ur beroa eta argiztapena. Horiez gain, etxetresna elektrikoetan eta entxufeetan kontsumitutako elektrizitatea ere sar liteke, baina azken hau ez da nahitaezkoa. Beraz, aipatutako azken erabileretarako kalkulatu behar da energia-eskaria, CEN arauak edota kalkulu-metodo baliokideak erabiliz. Ondoren, energia primarioarako bihurketa-faktoreak erabiliz, energia primarioaren kontsumoa zenbatetsi eta eraikinaren azalera erabilgarriaren metro karratuko adierazten da.



4. Irudia: energia-jardueraren kostu-maila optimoak ebaluatzeko prozesua [43].

Ebaluatutako neurri-paketeen emaitza-aniztasunetik abiatuta, kostu-kurba bat ondoriozta daiteke erreferentziatzko eraikin bakoitzarentzako, y-ardatzean zaharbertzeen kostu globalak adieraziz eta x-ardatza energia primario kontsumoa izanik. Horrela, kurbaren zatirik baxuenak optimo ekonomikoa adieraziko luke, 4. Irudiak erakusten duen moduan. Egia esan, kostu-maila optimoaren kokapena erabilitako datuen ziurgabetasunetik sentikorra izan daiteke; beraz, posible da kalkuluetan lortutako maila optimoak irudikoak bezain argiak ez izatea. Aldiz, litekeena da neurri-paketeen aniztasunak kurba zehatz bat osatu beharrean, datu-puntu

hodei bat eratzea, zeinetik batez besteko kurba bat ondorioztatu daitekeen. Beraz, kostu-maila optimoa ez da normalean eraikin bati aplikatutako neurri-pakete bakar gisa aurkituko, baizik eta eskualde batean kokatzen diren neurri-pakete multzoak osatzen duen kostu optimo "tartetzat".

Oro har, 244/2012 Erregelamendu Delegatuaren ezarritako metodologiak kalkulu-arau uniformeak definitzen ditu baina, aldi berean, malgutasun handia eskaintzen du sarrera-datuak ebaluatu eta hautatzeko, egoera espezifikoak kontuan hartzea ahalbidetuz eta neurria egindako analisiak baimenduz. Lan honetan burututako analisiaren irismena 3.2.2.1.1. atalean deskribatzen da.

### 3.1.2.2 Ebaluazio ekonomikoa: kostu globalaren kalkulua

Kostu-maila optimoaren metodologia balio eguneratu garbiaren metodoan oinarritzen da. Horrela, metodologiarekin kalkulatzeko diren *kostu globala*-ren terminoa, EN 15459 arautik hartua [44], literaturan orokorrean bizi-zikloaren kostua deritzonari dagokio. Beraz, hasierako inbertsioa ez ezik, kostu gehigarriak ere barne hartzen ditu, hala nola kostu operatiboak, mantentze-lanetakoak, ezabatze-kostuak eta energia aurreztekoak. Ikuspegi makroekonomikoaren kasuan, GHGen emisioen kostua ere hartzen da kontutan. Horrela, metodologiak bizi-zikloaren ikuspegi osoa du, eta ez da epe laburreko optimizazioetara mugatzen. Hala ere, bizi-zikloaren ebaluazioan (LCA) ez bezala, energia grisaren ingurumen-inpaktuak alde batera uzten ditu.

Kostu mota ezberdinak batzerakoan, deskontu-tasa aplikatu behar da kostu guztiak hasierako urteko balio gisa adierazteko, 1. ekuazioan bezala.

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \cdot R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (1)$$

non  $\tau$  kalkularen aldia den,  $C_g(\tau)$  kostu globala kalkulu-aldian zehar, hasierako urteko balio gisa adierazita,  $C_I$  neurri-paketearen hasierako inbertsio-kostua,  $C_{a,i}(j)$   $i$  urteko  $j$  neurriaren kostua,  $C_{c,i}(j)$   $i$  urteko  $j$  neurriaren karbonoaren kostua,  $V_{f,\tau}(j)$   $j$  neurriaren hondar-balioa kalkulu-aldiaren amaieran, hasierako urtera deskontatuta eta  $R_d(i)$   $i$  urteko deskontu-faktorea,  $r$  deskontu-tasaren arabera zenbatetsia 2. ekuazioak adierazten duen moduan.

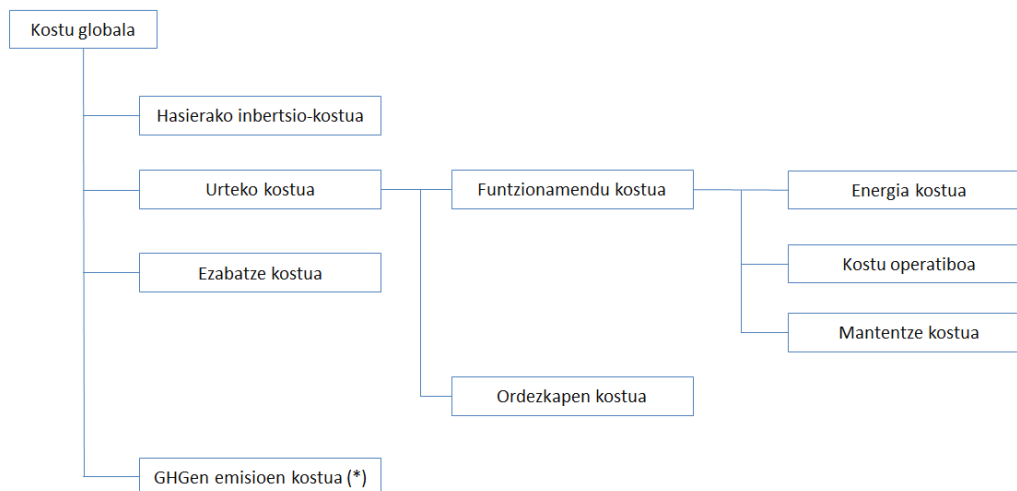
$$R_d(p) = \left( \frac{1}{1 + \frac{r}{100}} \right)^p \quad (2)$$

non  $p$  hasierako urtetik aurrerako urte-kopurua den, eta  $r$  deskontu-tasa erreala.

Kostuen kategorizazioa, 5. Irudian aurkeztzen dena, EN 15459 arauan oinarritzen da. Aztertutako neurri-pakete guztientzat berdinak diren kostuak, edota energia-jardueran eraginik ez duten eraikuntza-elementuekin zerikusia dutenak, alde batera uzten dira. Halaber, 6. Irudiak kostu-kategoria ezberdinak adierazten ditu, non 1 kalkulualdia den, 2 inbertsio-kostua, 3 funtzionamendu kostua eta 4 ordezkatzeko-kostua.

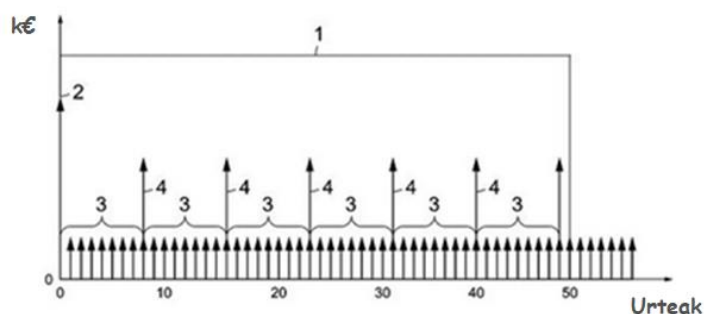
EN 15459 arauak, berez, 50 urteko balioa proposatzen duen arren bizitegi-eraikinetarako kalkulu-aldi gisa, 244/2012 Erregelamendu Delegatuak 30 urteko kalkulualdia ezartzen du

hauentzat. Kalkulu-aldi luzeagoak ez lirateke gomendagarriak; izan ere, 30 urtetik gora, are zailagoak bihurtzen dira interes-tasei eta energiaren prezio-aurreikuspenei buruzko hipotesiak. Hala ere, aukeratutako kalkulu-aldiak emaitzan duen eragina mugatua da, kalkulu-aldiaren amaierako hondar-balioak kontuan hartzen direlako.



(\*) Perspektiba makroekonomikoaren kalkulurako soilik

### 5. Irudia: kostu ezberdinen kategorizazioa [17].



### 6. Irudia: denboraren araberako kostuen irudikapena [44].

#### 3.1.2.3 Perspektiba ezberdinak

Kalkuluan kontuan hartzen diren kostu eta onuren arabera, bi ikuspegi nagusi bereizten dira kostu-maila optimoa zenbatesteko.

- Perspektiba soziala, ikuspegi makroekonomikoari dagokiona.
- Azken erabiltzailearen edo erabiltzaile pribatuaren banakako perspektiba: ikuspegi mikroekonomikoa.

Bakoitzak bere berariazko justifikazioa du. Alde batetik, gizartearen ikuspegi makroekonomikoa erregulazio politika ezberdinak definitzerakoan normalki erabiltzen den ikuspegi ekonomikoa da. Gizartearen edozein atalek jasandako kostu eta onura guztiak hartzen dira kontutan, zeharkakoak barne, non gertatzen diren desberdinu gabe. Beraz, ez dira bereizten gizarteko hainbat sektorek dituzten kostuak eta onurak, eta saldo garbia da garrantzitsua.

Bestalde, ikuspegi mikroekonomikoak inbertitzaile potentziala izan daitekeen partikular batek aurre egin beharreko kostu eta onura zuzenak baino ez ditu kontuan hartzen. Oro har, erabiltzaile tipikoak definitzea eskatzen du, eta hauei gizartearen ikuspegitik desiragarriak izan daitezkeen erabakiak hartzea eragozten dieten merkatu-oztopoak identifikatzen laguntzen du, inbertitzaile batentzako mugak erakutsiz. Hala ere, metodologia ikuspegi pribatu batetik aplikatzeak azken erabiltzaile “tipiko” bat (idealizatu) definitzea eskatzen du. Beraz, kontuan hartu behar da azterketaren emaitzek desberdintasun sozioekonomiko handiak ezkuta ditzaketela azken erabiltzaileen artean.

Esandakoaren arabera, ikuspegi sozialerako eta pribaturako kostuen kalkuluak desberdinak dira kontuan hartu beharreko interes-tasei, diru-laguntzei, zergei eta abarri dagokienez, eta ondorioz emaitza desberdinak eman ditzakete. 3. Taulak [41] bi ikuspegiak bereizten dituzten kostu-elementuak aurkezten ditu.

3. Taula: ikuspegi bakoitzean kontuan hartutako kostu-elementuak.

|                                       | <b>Ikuspegi pribatua</b> | <b>Ikuspegi makroekonomikoa</b> |
|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| <b>Interes-tasa</b>                   | merkatuko tasa           | gizartearen interes-tasa        |
| <b>Diru laguntzak</b>                 | ✓                        | ×                               |
| <b>Zergak</b>                         | ✓                        | ×                               |
| <b>CO<sub>2</sub> emisioen kostua</b> | ×                        | ✓                               |

Interes-tasei dagokienez, ikuspegi makroekonomikoan, “deskontu-tasa sozialarekin” eguneratzen dira, tasa hori, normalean, nahiko txikia izanik: urtean %3 inguru termino errealetan [40]. Ikuspegi mikroekonomikoan, kapitala lortzearen kostua nabarmen handiagoa izan ohi da.

Ikuspegi sozialean, zergak eta diru-laguntzak alde batera uzten dira, gizartearen atal batetik bestera dirua transferitu baino ez dutelako egiten, kostu edo irabazi agregatu bat suposatu gabe. Oro har, diru-laguntzak eta bestelako pizgarriak eraikinen jabeen eta inbertitzaileen ikuspegi pribatuari lotutako alderdiak dira. Horregatik, perspektiba mikroekonomikotik burututako kalkuletan diru-laguntza zuzenak inbertsio-kostuetatik deduzitu egiten dira, kenkari fiskalen eragina dute urteko funtzionamendu-kostuetan eta mailegu bigunek deskontu-tasa txikituko lukete, adibidez.

Bestalde, kanpo-eraginak deiturikoen kostu eta onurak zenbatesten ditu, hala nola karbono dioxidoaren emisioei lotutako kaltea ingurugiroan. Kasu horretan bere kostuak kalkulatzeko metodo espezifikoak badaude, eskuarki onartuak daudenak. Hala ere, praktikan ezinezkoa da gizartearentzako zuzeneko eta zeharkako kostu eta onura guztiak harrapatzea, batzuk ukiezinak edo zenbatu-ezinak direlako, edota ezin direlako monetizatu. Hala nola, eskulanean intentsiboak diren energia-eraginkortasuneko zaharberritzeek sorturiko lanpostuak, gizarte-segurantzaren arindu dezaketenak, edota etxebizitzaren baldintza termikoak hobetzeak osasun-sistema publikoan izan dezakeen eragina. Alderdi hauen eragina zenbatestea oso zaila bihurtzen da, eta beraz onura gehigarritzat hartzen dira maiz, kualitatiboki, kalkulu ekonomikoetan sartu gabe.

### 3.1.2.4 Sorrarazitako gogoeta

Ezbairek gabe, kostu-optimoaren metodologia aplikatzeak funtsezko informazioa eman dezake 2050. urterako ingurumen-helburuak lortzen laguntzeko, hainbat analisi-mota ahalbidetuz. Metodologiak eskainitako emaitzek eremu anitzetan lagun dezakete administrazio-publikoa, hala nola:

- Eraikinen birgaitze energetikoarekin lotutako energia aurrezki potentzialaren magnitude-ordena ebaluazioan.
- Energia-eraginkortasun maila ezberdinak lortzeko beharrezkoa den inbertsioaren kalkuluan.
- Zaharberitze-estrategia egokienaren identifikazioan, erreferentziatzko eraikin bakoitzerako birgaitze neurri multzo optimoa adieraziz.
- Birgaitze-maila jakin batzuk lortzeko beharrezkoak diren diru-laguntzen zenbatespenean.

Halere, metodologia aplikatzeko moduari arreta jarri behar zaio. 244/2012 Erregelamendu Delegatuak bi eraikin kategoria bereizten zituen bizitegi-sektorearentzako: familia bakarreko etxeak eta apartamentu-blokeak. Horrela, kategoria bakoitzarentzako gutxienez erreferentziatzko eraikin bi definitzea baino ez zien eskatzen estatu kideei. Eraikin-parke nazionalen heterogeneotasun handia kontuan hartuta, galdera argia da: benetan izan daiteke, hain eraikin kopuru txikia, eraikin-parke nazional baten adierazgarri?

Halabeharrez, erreferentziako eraikin batzuen edo besteen hautaketak eragina du ebaluazioaren emaitzetan. Beraz, onartzen den ziurgabetasun bat dago beti erreferentziako eraikinen aukeratzearekin lotuta. Nolanahi ere, erreferentziatzko eraikin bakoitzarentzako lortutako emaitzak tipologia bereko gainerako eraikinei modu sinesgarrian hedatu ahal izatea metodologiaren erabilgarritasunarentzako oinarritzko baldintza da. Erreferentziatzko eraikin kopurua nahikoa ez bada eraikin parke handi bat behar bezain homogeenoa diren eraikin-tipologietan sailkatzeko, ezinezkoa da ebaluazioaren emaitzak parke osoaren mailara estrapolatzea. Zentzu honetan, badaude ikerlariak euren buruari galdetzen ea kostu-optimoaren metodologiak tipologia bereko eraikin guztientzako emaitza fidagarriak bermatzen dituen [10]. Horrenbestez, lan honek estatu-mailako eraikin-parkeak baino eskala txikiago bat eta erreferentziatzko eraikin kopuru handiagoa konbinatzen ditu.

## 3.1.3 Aukera diskretuko ereduak

### 3.1.3.1 Oinarri teorikoa

Aukera diskretuko ereduak Ausazko Erabilgarritasunaren Teorian (Random Utility Theory, RUT) oinarritzen dira [45]. Honen arabera, gizabanako bakoitza erabakitzaile arrazional bat da, hautaketa baten aurrean alternatiben ezaugarriak ebaluatzen dituena eta, ondoren, erabilgarritasuna maximizatzen duena aukeratzen du.

Erabakitzaile batek,  $J$  alternatiben arteko hautaketari egin behar dio aurre. Aukera bakoitza hautatuz gero, erabakitzaileak erabilgarritasun-maila jakin bat lortuko luke.  $j$  aukeratik  $i$  erabakitzaileak lortzen duen baliagarritasuna  $U_{ij}$  da ( $j = 1 \dots J$ ). Erabakitzaileak erabilgarritasun

handiena ematen dion alternatiba aukeratzen du. Beraz, jokabide-eredua hurrengoa da:  $n$  aukera hautatuko du, baldin eta  $U_{in} > U_{ij} \forall j \neq n$ .

Baina behatzaile batek ez du erabakitzailearentzako erabilgarritasuna ezagutzen, alternatiben eta erabakitzailearen ezaugarri edo atributu batzuk baino ez baititu ikusten. Horrela, alternatiba bakoitzaren erabakitzailearentzako erabilgarritasuna ezaugarri horien funtzio moduan defini daiteke, azaldu ezin den erabilgarritasunaren zatia akats estokastikoko termino batez adieraziz. Beraz,  $i$  erabakitzaile batek  $j$  aukeratik lortzen duen erabilgarritasuna 3. ekuazio gisa adieraz daiteke [46].

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} = \beta_j^0 + \beta' X_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

non  $V_{ij}$  erabilgarritasunaren osagai determinista den eta  $\varepsilon_{ij}$  zorizko osagaia, erabilgarritasunearan eragina duten baina  $V_{ij}$  -n sartuta ez dauden faktoreak atzematen dituena.  $X_{ij}$   $j$  alternatibaren eta  $i$  erabakitzailearen ezaugarrien (atributuen) bektorea da, eta  $\beta$  atributu horien bektore-koefizientea.  $\beta_j^0$   $j$  alternatiben konstante espezifikoa (*alternative-specific constant*, ASC), aukera honek besteekiko duen lehentasun erlatiboa adierazten duena.

Aukera diskretuko ereduen artean, gaur egun zabalduea, zalantzarik gabe, *logit*<sup>2</sup> (MNL) eredua da. Eredu hau  $\varepsilon_{ij}$  zorizko osagaiari banaketa konkretu bat esleituz lortzen da; hots, Gumbel probabilitate-dentsitatea. Zehaztapen horrekin, *logit* eredu baten probabilitatea 4. ekuazioan adierazitakoa dela frogatu daiteke.

$$P_{in} = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{ij}}} = \frac{e^{\beta_n^0 + \beta' X_{in}}}{\sum_{j=1}^J e^{\beta_j^0 + \beta' X_{ij}}} \quad (4)$$

Erabilgarritasunaren funtzioan alternatiben ezaugarriak sartzen direnean, lortutako diren ereduak bereziki egokiak dira gobernu-politikek alternatiba ezberdinen erakarpenean duten eragina balioesteko. Politika-neurri batek alternatiben ezaugarri bat aldatzen duenean, honen balio berria erraz kontsideratu daiteke zenbatetsitako eredu eta ondoriozko erabilgarritasuna birkalkulatu.

Hala ere, *logit* ereduak zenbait muga dituzte. Besteak beste, lehentasunaren aldaketa sistematikoa baino ezin dezakete adierazi; hots, erabakitzailearen ezaugarriekin zerikusia duen lehentasun-aldaketa. Baina ez ausazko lehentasun-aldaketarik, hau da, behatutako ezaugarriekin lotu ezin diren lehentasun-aldaketarik. Muga hauek gainditzeko, *mixed logit* (MXL) eredu malguagoak erabil daitezke, edozein zorizko erabilgarritasun-eredu egokitu dezaketenak. Lan honetan MXL eredu bat estimatu da.

MXL ereduaren zehaztapena MNL ereduarenaren antzekoa da, baina  $\beta$  koefizienteak konstanteak izan beharrean, populazioko erabakitzaileen artean aldatu egiten dira  $f(\beta)$  dentsitate batekin. Beraz, MXL eredu zorizko koefizienteetan oinarritzen da, populazioko  $b$  batezbesteko eta  $W$  bariantza parametroen arabera definitzen direnak. Gehien erabilitako  $f(\beta)$  dentsitate-funtzioak normala –  $\beta \sim N(b, W)$  – eta log-normala –  $\ln \beta \sim N(b, W)$  – dira.

<sup>2</sup> Literaturan, *multinomial logit* eta *conditional logit* ereduak bereizten dira, kontsideratutako atributuak erabakitzailearenak edota alternatibenak direnaren arabera, hurrenez hurren. Halere, sarritan *multinomial logit* (MNL) izena erabiltzen da *logit* ereduaren sinonimo bezala. Lan honetan MNL akronimoa erabiltzen da *logit* ereduari erreferentzia egiteko.

Horrela,  $i$  erabakitzaileak  $n$  aukera aukeratzeko probabilitatea 5. ekuazioan adierazitakoa litzateke. Hau da, MXL ereduaren probabilitatea MNL ereduaren probabilitateen batzbesteko haztatua da,  $\beta$  balio ezberdinetan ebaluatutakoa.

$$P_{in} = \int \left( \frac{e^{V_{in}}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{ij}}} \right) \cdot f(\beta) \cdot d\beta \quad (5)$$

### 3.1.3.2 Aukera diskretuko esperimendua

Erabaki batean aldagai edo atributu ezberdinek duten eragina zehazteko, aukera diskretuko esperimenduak (*discrete choice experiment*, DCE) metodorik erabilienetakoak dira. Hauetan, elkarrizketatutako lagin baten aukerak behatu eta aztertu egiten dira. Literaturan, DCEak burutzeko gida ugari daude [47] [48].

Funtsean, inkestatutakoei hautaketa-lan batzuk osatzeko eskatzen zaie, zenbait aukera-multzo aurkeztuz eta bakoitzean aukera bat hautatzeko eskatuz. Aukerak atributu batzuen arabera definitzen dira, aukera bakoitzak dagozkion atributu-mailak izanik. Aukera-multzoak diseinatzerakoan, konpromezu bat bilatu behar da atributu bakoitzaren eraginaren eta estatistikoki esanguratsuak diren erlazioak detektatzeko esperimenduak duen gaitasunaren artean.

Kontzeptualki, DCE baten diseinua balio-matrize bat zehaztea besterik ez da, atributu-mailen bidez aukera ezberdinak definitu eta hauek aukera-multzoetan elkartzen dituen. Tradizionalki, diseinu experimental ortogonalak erabili izan dira, baina gaur egun gero eta gehiago erabiltzen dira diseinu *efizienteak*. Azken hauek, zenbatespen-helburuetarako datuen korrelazioa minimizatzen saiatzeaz gain, ahalik eta errore estandarrik txikieneko parametroak erdiesteko datuak lortzen saiatzen dira.

Errore estandar hauek kobariantza-matrize asintotikoaren diagonaleko elementuen erro karratuak dira. Baina, aldi berean, kobariantza-matrize hau ( $\Sigma$ ) balioestekak esperimenduari lortu nahi diren parametroak ezagunak izatea eskatzen du. Beraz, normalean parametro hauen balioak aurretiaz suposatu egiten dira (beste lan batzuetan oinarrituz, adibidez) eta hurbilketa horretan oinarrituz kobariantza-matrizea estimatzen da.

DCE baten diseinuaren efizientzia neurtzeko, D-errorea da gehien erabiltzen den neurria, kobariantza-matrizearen determinantean oinarritzen dena. 6. ekuazioak D-errorearen adierazpena ematen du,  $k$  estimatutako parametro kopurua izanik. Diseinu efizienteen helburua D-errorea minimizatzea da.

$$D - errorea = |\Sigma|^{-\frac{1}{k}} \quad (6)$$

### 3.1.3.3 Ereduaren estimazioa

Populazio baten parametro ezezagunak zenbatesteko problema batean,  $N$  behaketako ausazko lagin batetik abiatuz, egiantz funtzioak 7. ekuazioaren forma hartzen du.

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^N P_i(\beta) \quad (7)$$

Non  $P_i(\beta)$   $i$  erabakitzailearen hautaketaren probabilitatea den eta  $\beta$  estimatu beharreko parametroen bektorea. Funtzio honen orde, erabiliagoa den egiantzaren logaritmo-funtzioa 8. ekuazioan adierazten da.

$$\log L(\beta) = \sum_{n=1}^N \log P_n(\beta) \quad (8)$$

Parametroen estimazioaren helburua da  $\log L(\beta)$  maximizatzen duten  $\beta$  balioak lortzea. Egiantzaren logaritmo-funtzioa egiantzaren funtzio monotonoki gorakorra denez,  $\log L(\beta)$  maximizatzen duten balioek  $L(\beta)$  ere maximizatuko dute.

Egiantz handieneko (*maximum likelihood*, ML) estimazioarentzako algoritmo ugari existitzen dira, hala nola, Newton-Raphson, Berndt-Hall-Hall-Hausman, etab. [46].

### 3.1.3.4 Doikuntza-egokitasuna

Eredu lineal estandarretan, estimazioaren doikuntza-egokitasuna oro har  $R^2$  determinazio-koefizientearekin ebaluatzen da, ereduak azaltzen duen mendeko aldagaiaren aldakuntza totalaren proportziotzat. Hala ere, aukera diskretuko ereduak bezalako eredu ez-linealetan hau ez da aplikagarria.

Horren orde, ML estimazioaren doikuntza-egokitasuna aztertze, pseudo- $R^2$  deituriko koefiziente ezberdinak daude. Gehien erabiltzen dena 70ko hamarkadan McFaddenek proposaturikoa da (9. ekuazioa). Funtsean, koefizienteak neurtzen du zer ongi portatzen den eredu, zenbatetsitako parametroekin, parametro guztiak zero diren ereduarekin (eredu nuluekin) alderatuta. Horretarako, bi eredu horien egiantzen logaritmo-funtzioak erabiltzen ditu.

$$R_{pseudo}^2 = 1 - \frac{\log L(\beta)}{\log L(0)} \quad (9)$$

non  $\log L(\beta)$  eta  $\log L(0)$  egiantzaren logaritmo-funtzioak diren, zenbatetsitako parametroekin eta parametro guztiak zero direnean, hurrenez hurren. Aipatu beharra dago pseudo- $R^2$  koefizientearen interpretazioa ez dela inondik ere erregresioetan erabiltzen denaren antzekoa. pseudo- $R^2$  koefizienteak ez du intuizioz interpreta daitekeen zentzurik. Egiantzaren logaritmo-funtzioaren gehikuntzaren ehunekoa baino ez da, parametroak zero diren balioaren gainetik. Unitatetik gertu dagoen balioak zero balioa baino doitze hobe adierazten du [49].

Bestalde, aukera diskretuko bi eredu ezberdin alderatzeko, egiantza-ratioaren testa (LRT) erabiltzen da. Zehazki, bi ereduetako bati mugaren bat ezarriz gero lortzen den eredu-murriztua ( $\beta_r$ ) mugarik gabeko eredu askearekin ( $\beta$ ) konparatzeko. Egiantza-ratioaren estatistikoa beren egiantzeen logaritmo-funtzioen ( $\log L$ ) diferentzia gisa adierazten da, 10. ekuazioak adierazten duen moduan. Aztertutako datuek murrizketa hori berrestuko balute (hau da, hipotesi nulua baztertu), bi egiantzeen logaritmo-funtzioak antzekoak izango liriateke eta, beraz, estatistikoaren balioa oso txikia izango litzateke. Baztertze balio kritikoa  $\chi_q^2$  banaketa batek ematen du,  $q$  murrizketa-kopurua izanik.

$$LRT = 2 \cdot [\log L(\beta_r) - \log L(\beta)] \sim \chi_q^2 \quad (10)$$



Hala ere, konparatutako bi ereduen parametro kopuruak kontuan izan behar dira, eredu baten egiantzaren logaritmo-funtzioa nahierara handitu egin daitekeelako parametro gehiago eta gehiago erantsiz. Beraz, bi eredu alderatzean, parametro kopuru handiena daukan ereduaren ugaritasun erlatibo hori nolabait zigortu egin behar da. Horretarako 2 metodo nagusi daude. Akaikeren informazio-irizpidean (AIC), 11. ekuazioa minimizatzen duen eredia aukeratuko genuke  $p$  ereduaren parametro kopurua izanik.

$$AIC = -2 \cdot \log L(\beta) + 2p \quad (11)$$

Schwarz informazio-irizpidean (SIC), berriz, 12. ekuazioa minimizatzen duen eredia aukeratuko genuke,  $N$  behaketa kopurua izanik.

$$SIC = -2 \cdot \log L(\beta) + p \log N \quad (12)$$

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Lehenengo fasea: eraikuntza parkearen karakterizazioa

Proposatutako metodologia behetik gorako ingeniari-tza-metodo batean oinarritzen da, eraikuntza-parke osoa adierazten duten eraikin-arketipoen ereduak eraiki eta ebaluatzea ahalbidetzen duena. Metodo honek, balizko birgaitze energetiko ezberdinen eragina xehetasun handiarekin ebaluatzea ahalbidetzen du. Halaber, eraginkortasun energetikoko politikak ezartzen laguntzeko metodo egokiena den arren, behetik gorako ingeniari-tza-ikuspegi honek eragozpen batzuk ere baditu, esparru teorikoan aipatu den bezala. Metodologia honek eragozpen horiei aurre egitera bideratuta dago.

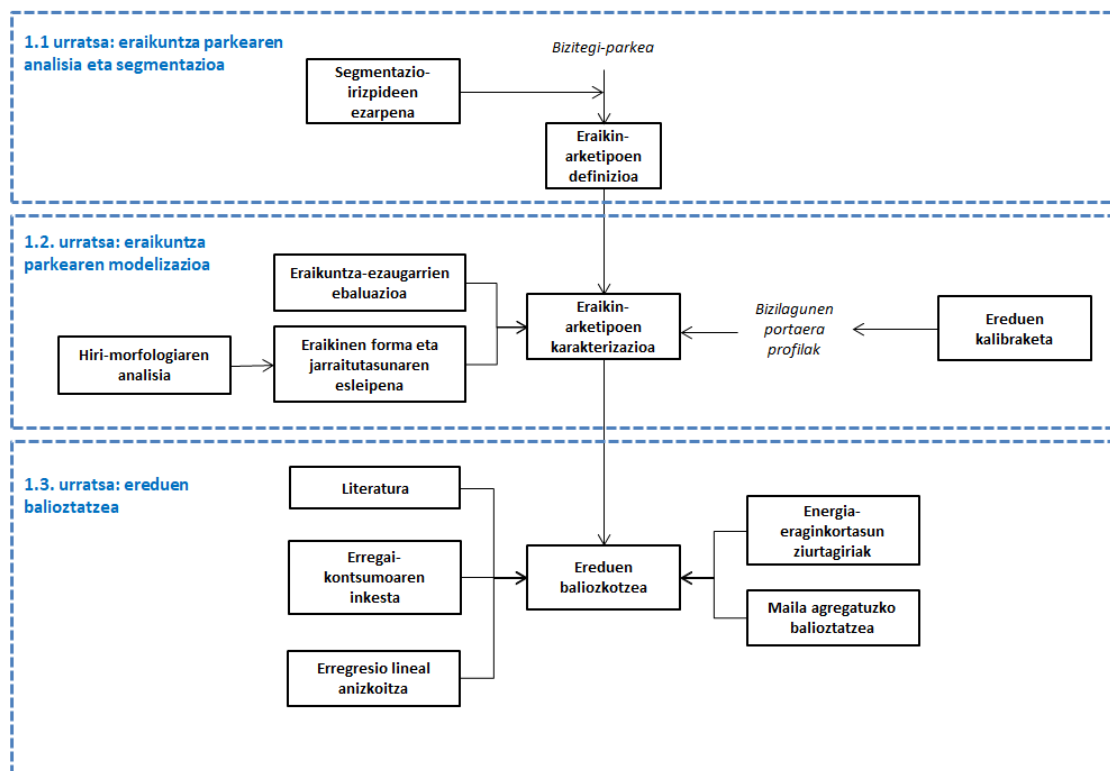
Analisiaren irismena etxebizitza-parkea hartzen du barne, eraikuntza sektorearen zatirik handiena dena. Halaber, etxe-berokuntza aztertzen du gehienbat, etxeko energia kontsumoaren erantzule nagusia dena eta baita eraikinaren ezaugarriek gehien baldintzatzen duten energia erabilera ere. Gainera, metodologia honen aplikazioaren bitartez, UBSren erabilera ere aztertzen da zeharka.

Laburbilduz, proposatutako metodologiak hurrengorako balio du:

- Hiri-mailako etxebizitza-parkea eraikin-arketipo adierazgarrien multzo ezberdinetan sailkatzeko, eta
- Euren energia-kontsumo termikoa karakterizatzeko; hau da, berokuntza eta UBS kontsumoak modu fidagarrian balioesteko.

Erabiltzen dituen informazio-iturri nagusiak kontuan hartuta, metodologia hau Estatu mailako edozein hiritan litzateke aplikagarria. Lan honetan, Bilbo hiriaren bizitegi-sektoreari aplikatu zaio, 17 eraikin-arketipo modelatuz. Inplementazio hau II. Eranskinean aurkezten da.

Jarraitutako metodologia hiru urrats nagusitan banatzen da, 7. Irudian laburbiltzen direnak: eraikuntza parkearen analisia eta segmentazioa, eraikuntza parkearen modelizazioa eta ereduaren balioztatzea.



### 7. Irudia: metodologiako lehenengo fasearen aurkezpen orokorra.

1.1. urratsaren helburua modelatu eta simulatu beharreko eraikin-arketipoak definitzea da. Horrela, segmentazio-irizpideak zehazten dira, horien arabera eraikin-arketipo ezberdinak identifikatzeko. 1.2. urratsa arketipo-ereduak eraikitzeko beharrezkoak diren parametro fisikoak eta bestelako sarrera-datuak zehaztera bideratuta dago eta baita eredu horien simulaziora softwarearen bidez. 1.3. urratsak etxebizitzaren benetako energia kontsumoa lortzeko metodo ezberdinak aztertzen eta proposatzen ditu, simulazioen emaitzekin alderatzeko eta, horrela, eraikitako ereduak balioztatzeko. Hurrengo atalek urrats bakoitzean sakontzen dute.

#### 3.2.1.1 1.1. urratsa: eraikuntza parkearen analisia eta segmentazioa

1.1. urratsak egungo etxebizitza-parke osoa fidelki adieraz dezakeen eraikin-arketipo multzoa definitzea du helburu. Horretarako, lehenik eta behin etxebizitzak talde edo multzo homogeenetan sailkatu behar dira. Sailkapen horrek zenbait segmentazio-irizpide zehaztea eskatzen du, aplikatu beharreko irizpide kopurua bilatutako zehaztasun mailaren arabera izanik. Zehaztasun egokia ezinbestekoa da, aurrerago eraikin-arketipoei aplikatu dakizkiekeen birgaitze energetikoen analisen zehaztasuna mugatzen baitu. Aldi berean, konpromiso bat beharrezkoa da eraikin parkearen segmentazioaren sakontasunaren eta ondoriozko eraikin-arketipo ereduak eraikitzeko behar den denbora eta ahaleginaren artean.

Metodologia honek hurrengo hiru segmentazio-irizpideak aplikatzen ditu:

- Eraikinaren eraikuntza-garaia, ingurutzailaren eraikuntza-ezaugarriak baldintzatzen dituen. Zentzu honetan, kontuan hartu beharreko mugari garrantzitsuen artean karga-horma lodietatik horma arinetara igarotzea, orri bakarrek hormetatik orri

bikoitzerako aldaketa edota isolatzaile termikoaren eransketa izango genituzke. Azken batean, eraikuntza-ezaugarriak garai bakoitzeko arau teknikoen arabera irateke.

- Eraikinaren altuera, solairu kopuruari dagokionez. Honek eraikinaren inguratzaile termikoaren azaleraren eta bolumen osoaren ratioa den forma-faktorean eragiten du, eraikinaren trinkotasunaren adierazle dena eta bere energia kontsumoan eragina duena. Aldi berean, eraikinaren altuera segmentazio-irizpide gisa erabiltzeak eraikin-arketipo bakoitzari esleia dakizkiokeen hiri-morfologia posibleen sorta murrizten laguntzen du, eraikinaren forma eta jarraitasunaren (aldameneko eraikinekiko loturaren) esleipena erraztuz.
- Etxebizitzaren azalera erabilgarria. Eraikuntzaren trinkotasunean ere eragina izateaz aparte, eraikin-arketipo jakin bat kokatu daitekeen auzoak mugatzen ditu. Beraz, irizpide honek eraikin-arketipo bakoitzari dagozkion hiri-morfologia eta eraikuntza-forma espezifikoetara bideratzen du zeharka.

Berokuntza-sistema mota ez da segmentazio-irizpide gisa definitu. Eraikin-arketipoen portaera energetikoak energia-eskari moduan simulatuz, gerora energia-kontsumora aise bihur daitezke dagokien sasoiko batez besteko efizientziak aplikatuz. Horrela, gehiegizko segmentazio-irizpideen ezarpena saihesten da, proposatutako hiru irizpideetan oinarritutako eraikuntza parkearen sailkapen sakonagoa ahalbidetuz.

Hiru segmentazio-irizpideak konbinatuz etxebizitzaren kluster-mapa bat sortzen da, talde homogeneo adierazgarrienak identifikatzea ahalbidetuz. Segmentazio-irizpide bakoitzaren muga-balioak eta tarteak parametro horiek eraikuntza parkean duten banaketa orokorraren arabera izan behar dira.

Azterketa hori egiteko, datu-iturri nagusia Espainiako Estatistika Institutu Nazionalak (INE) hamar urtean behin egiten duen Biztanleriaren eta Etxebizitzaren Errolda da [50], azken aldiz 2011. urtean egin zena. Informazio eskuragarri gehiena norbanako etxebizitzari buruzkoa da, eta ez eraikinei buruzkoa. Eraiki eta simulatu beharreko arketipoak, ordea, eraikin osoak dira, eta ez etxebizitza indibidualak. Beraz, lehenik eta behin talde homogeneo ezberdinen adierazgarritasuna etxebizitza indibidualei dagokienez ebaluatu behar dira eta, ondoren, erlazio bat ezarri etxebizitza adierazgarri horien eta hauek osatutako eraikin-arketipoen artean.

II. eranskineko II.10. taulak Bilboko bizitegi-sektorearentzat modelatutako 17 eraikin-arketipoen ezaugarriak adierazten ditu.

### 3.2.1.2 1.2. urratsa: eraikuntza parkearen modelizazioa

Eraikin-arketipo ereduaren eraikuntzak datu kopuru handia eskatzen du sarrera gisa. Datu enpiriko ugarien beharrak nahitaezkoa bihurtzen du ereduari sartutako informazioaren xehetasun-mailaren eta datuak biltzeko denboraren arteko konpromisoa.

Badaude eraikinei lotutako zenbait ezaugarri euren portaera termikoan beste batzuek baino eragin handiagoa dutenak eta, beraz, metodologia honek horietan jartzen du arreta. Hurrengo hiru faktore nagusiak identifikatu dira:

- Fatxadaren konposizioa.

- Eraikina kokatuta dagoen hiri-morfologia, eraikinaren forman eta jarraitasunean eragina duena.
- Bizilagunen portaera energetikoaren profilak.

#### 3.2.1.2.1 *Fatxadaren konposizioa*

Atal honek fatxada konposizio ohikoenak ebaluatzea eta modelatu beharreko eraikin-arketipoei esleitzea du helburu. Ildo horretan, datu-baseen gabezia berretsi da eskualde mailan eta, beraz, informazio hori erdiesteko bestelako iturriak mota askotarikoak izan daitezke. Halere, kontuan izan behar da helburua hemen ez dela existitzen diren fatxada konposizioen azterketa zehatza egitea, ezta horiek sakonki karakterizatzea. Hain arlo zabal horrek beste ikerketa-lerro ezberdin bat osatuko luke bera bakarrik.

Badaude eraikuntza parkea karakterizatzen duten aurretiko proiektuak, estatu eta eskualde mailan, ohiko eraikuntza konposizioen ikuspegi orokor bat eman dezaketenak [51] [52] [53] [54]. Oro har, ikerlan horiek deskribatzen dituzten fatxada konposizioak oso antzekoak dira, desberdintasun txikiak izan arren xehetasunei dagokienez; adibidez, orri bikoitzeko hormak zabalki erabiltzen hasi ziren uena.

Ikuspegi orokor hori arkitektura arloko argitalpen tekniko zehatzagoekin osa liteke. Sarritan, kokapen zehatz bateko estilo arkitektonikoen garapena aztertzen duten doktore-tesiek eta liburuak historikoki erabilitako eraikuntza material eta osaerei buruzko informazioa dute [55]. Bestalde, eraikinak birgaitzeko katalogoak ere existitzen dira, non egungo eraikinen ingurutzailerik adierazgarrienen osaerari buruzko informazioa ere aurki daitekeen [56].

Azkenik, Eraikinen Ikuskaritza Teknikoen (EIT) txostenek kokapen zehatz bateko eraikuntza ingurutzailerik ezberdinen banaketari buruzko informazioa eman dezakete. Eraikin baten azterketaren osteko EIT txostenak eraikin horren egoera adierazten du, hiru alderdirekin harreman duta: bere kontserbazio-egoera, irisgarritasun unibertsalaren araudiaren konplimendua eta bere eraginkortasun energetikoa. EITen inguruko araudia Estatuko legedian oinarritzen da, 8/2013 legea [57] izanik erreferentzia nagusia 7/2015 Errege Dekretuak neurri handi batean salbuetsi zuen arte [58], baina autonomia erkidego eta udal mailako araudia dira legeria hori garatzen dutenak. EIT txostenek daukaten informazio mota dela eta, eraikinaren fatxadaren ezaugarriak barne, garrantzizko datu-iturritzat erabil daitezke ingurutzailerik konposizioari buruzko informazioa biltzeko.

#### 3.2.1.2.2 *Hiri-morfologia*

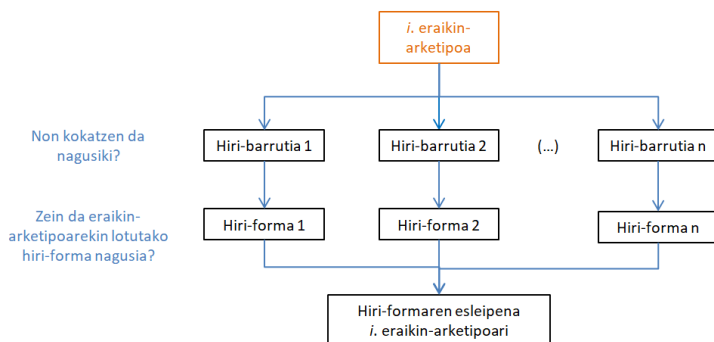
Askotan eraikinen eraikuntza-tipologiek lotura estua dute kokatzen diren hiri-ehunarekin. Hiri-morfologia zabalago baten zati gisa, eraikinak ezin dira banan-banan ebaluatu kokatuta dauden hiri antolamenduaren ikuspegi integralagorik gabe.

Energiaren ikuspuntutik, hiri-morfologiak eraikinen portaeran duen efektua balioestea konplexua da, eragina izan dezakeelako eraikinen ezaugarri geometrikoetan (forman eta jarraitasunean), inguruko elementuek sorrarazitako kanpo-itzelean (eta, beraz, iristen zaion eguzki-erradiazioan) eta tokiko mikrokliman eta aire-fluxuaren patroian. Faktore horiek guztiak aldi berean simulatzearen zailtasuna da, hain zuzen ere, hiri-eredu termiko integralen gabezia azaltzen duena. Gaur egun, hiri morfologiak energia-kontsumoan duen eragina eztabaidan

jarraitzen du [59]. Metodologia honen helburua ez da azterketa horretan sakontzea. Horren ordez, bere arreta hiri-morfologiak eraikin-arketipoen propietate geometrikoetan duen eraginean jartzten du; hau da, eraikinen forman eta jarraitasunean.

Bestalde, badira Espainiako tokiak non eguzki-erradiazioaren eragina eta, beraz, hiri-morfologiaren ondoriozko itzalarena, benetan garrantzitsua izan daitekeen. AEMETek neurtutako eguzki-irradiazioaren datuek [60] kokapen zehatz batean kanpo-itzalaren eragina kontuan hartzearen garrantzia adieraz dezakete. Bilboren kasuan, eguzki-irradiazioaren eragina ez da beste hiri batzuetan bezain garrantzitsua: 1983-2005 aldiaren neurtutako eguzki-irradiazioaren datuen arabera, eguzki-irradiazio txikiena duen Espainiako hiriburua da; eguneko 3,54 kWh/m<sup>2</sup>-ko bataz bestekoarekin. Gainera, bere topografia bereziak, muinoz inguratua, are txikiagoa egiten du eguzki-izpien eragina.

Prozedura bat proposatzen da eraikin-arketipo bakoitzari eraikin forma eta jarraitasun zehatz bat esleitzeko. 8. Irudiak prozesua laburbiltzen du, hiri mailako etxebizitza adierazgarrietatik auzo mailara jaisten dena, eta gero berriro hiri-mailara itzuli.



#### 8. Irudia: eraikin-arketipo bakoitzari forma eta jarraitasuna esleitzeko prozedura.

Hasiera batean, etxebizitza adierazgarrien banaketa espaziala aztertzen da, etxebizitza mota zehatz bat gehien kontzentratzen den hiri-auzoak identifikatuz. Zenbait hiri-auzo hautatzen dira etxebizitza adierazgarri bakoitzeko.


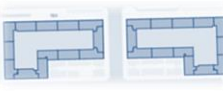

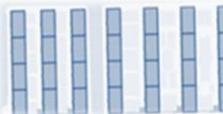

Ondoren, identifikatutako auzo bakoitzean arreta jarritz, etxebizitza adierazgarriarekin (edo, gauza bera dena, honek osatutako eraikin-arketipoarekin) erlazionatutako auzoaren hiri-morfologia nagusia aztertzen da, auzoz auzo. Sarritan, auzoek hiri-morfologia erregularra erakusten dute, prozesu hau erraztuz. Halere, udal mailako datu-base geo-erreferentziaturik ez egoteak prozesu hau neketsua bihur dezake. Kasu horretan, eraikinen adin-mapak eraiki behar dira, katastroarekin eraikin bakoitzari dagokion eraikuntza garaia eta solairu kopurua identifikatuz.

Prozesu honetan ez da kontuan hartzen eraikin-arketipoari dagokion etxebizitza-azalera. Alde batetik, eraikinen eraikuntza-garaia eta solairu kopurua kontuan hartuta, orokorrean argi eta garbi nagusitzen den hiri-morfologia bat dagoelako, etxebizitza-azalera edozein delarik ere. Halaber, askotan zaila izan daiteke eraikin bati etxebizitza-azalera bat esleitzea, eraikin beraren barruan azalera ezberdinetako etxebizitzak egon daitezkeelako. Beraz, etxebizitza-gainazala kontuan hartzea nekeza izateaz gain, onura nabarmenik gabekoa litzateke.

Azkenik, eraikin-arketipo eta auzo bikote bakoitzari hiri-morfologia espezifiko bat esleitu ondoren, hiri mailan nagusi den hiri-morfologia inferitzen da. Horretarako, eraikin-arketipoak auzo ezberdinetan duen banaketa kontuan hartzen da.

Azaldutako prozedurarekin aurki daitezkeen hiri-morfologia mota nagusiak 4. Taulan erakusten dira. Hasiera batean, bost hiri-morfologia mota nagusi identifikatzen dira. Halere, kanpo itzalaren eragina mespretxagarritzat hartzekotan, 2, 3 eta 4. hiri-morfologiak mota bakar batean bildu litezke.

4. Taula: hiri-morfologia mota nagusien deskribapena.

| Hiri-morfologia |   | Ezaugarriak  | Trazatuaren adibidea  |
|-----------------|---|--|---|
| 1               | <b>Bloke solidoa</b>                    | XIX. mendeko zabalgunetako forma tipikoa. Eraikinak trazatu trinko batean integratzen dira fatxada bakarra izanik kalera emanaz.   |    |
| 2               | <b>Barruko patioa duen bloke itxia</b>  | Eraikinak XIX. mendeko hiri-trazadura tipikoa betetzen duen perimetro baten barruan daude, kanpoko itxura bloke solidoaren antzekoa izanik.  |    |
| 3               | <b>Barruko patioa duen bloke irekia</b> | Aurrekoaren antzeko hiri forma. Blokearen alde bat galtzen du, eraikigarritasuna txikituz baina argia eta aireztapena irabaziz, eta eraikinen arteko jolas-eremuak sortuz.                             |  |
| 4               | <b>Bloke lineala</b>                    | Ohiko bloke arrazionalista, argiaren, aireztapenaren eta eguzki-argiaren ideal higienikoen arabera eraikia. Garai bateko etxebizitza gabeziari eraikin sinpleen serializazioaren bidez erantzun ziona. |  |
| 5               | <b>Banakako eraikinak</b>               | Beste eraikin batzuekin inguratzailearen zatirik kontaktuan ez duten eraikinak.  |  |

### 3.2.1.2.3 Bizilagunen portaera energetikoa: ereduaren kalibraketa

Bizilagunen portaera energetikoaren izaera estokastiko eta anizkuna dela eta, bere modelizazioa eraikinen jardura energetikoa ebaluatzearen erronka handienetakoa da. Horren aurrean, bizilagunen portaera espezifiko ezberdinak zehatz-mehatz deskribatu beharrean, metodologia honek portaera orokorrak ditu aztergai.

Metodologiak okupazio-profil deterministak erabiltzen ditu bizilagunen portaeraren alderdi ezberdinak modelizatzeko, hala nola, berokuntzaren erabilera-aldiak, termostatoaren tenperatura edota etxetresnen erabilera-programazioak. Profil hauek bizilagunen portaera kuantitatiboki adierazteko aukera ematen dute, nahiz eta bizilagunen jokabidearen

ausazkotasunak, etxebizitzaz etxebizitzako ikuspegi batean, desadostasun handiak eragin ditzakeen modelatutako portaera energetikoaren eta errearen artean.

Askotan, estatu-mailako eraikuntza-kodeek erreferentziazko okupazio-profilak eskaintzen dituzte eraikinen azterketa energetikorako. Hala ere, aipatu den bezala, bizilagunen portaeraren modelazioak dakarren ziurgabetasuna da maiz ingeniari-tza-metodoen bidez eraikitako arketipo eredu sinesgarritasuna mugatzen duena. Gabezia hori gainditzeko, lan honek metodo alternatibo bat proposatzen du, kontsumo errearen datuetan oinarrituta, profil hauek lortzeko. Metodo enpiriko honek berokuntza zentrala duten eraikin-komunitateen faktura-datu errealak erabiltzen ditu.

Berokuntza zentrala duten eraikin-komunitate horiei dagokienez, 2012/27/EB Zuzentarauak [14] banakako neurgailuak jartzera derrigortzen zuen 2017ko urtarrilaren 1etik aurrera, etxebizitza bakoitzari bere benetako energia kontsumoa kobratzeko. Zuzentarauaren transposizioaren aurreikuspenak komunitate asko neurgailuak instalatzera bultzatu zituen, Espainiako legearen argitalpenari itxaron gabe. Komunitate hauen fakturretan, ohiko da etxebizitza bakoitzean neurtutako kontsumo balioak agertzea, guztiak batera. Beraz, horrelako faktura gutxirekin etxebizitza askoren kontsumo datuak bildu daitezke, UBS eta berokuntza ere bereizten dituztenak.

Metodologiak berokuntza zentrala duten 1981aren osteko hainbat eraikinetako berokuntza-kontsumoak biltzea proposatzen du, hipotesi hauetan oinarrituz:

- Bizilagunen portaera energetikoa batez ere ezaugarri soziodemografikoekin lotuta dago, hala nola, bere adinarekin edota egoera ekonomikoarekin, eta ez eraikinaren ezaugarri fisikoekin.
- Bildutako kontsumo-datuekin lotutako eraikinak etxebizitza anitzez osatuta daude, non mota guztietako talde soziodemografikoak bizi daitezkeen. Guztira, talde bakoitzaren ekarpena eraikinaren berokuntza kontsumoari dagokionez, etxebizitza parke osoan gertatzen denaren adierazgarritzat jo daiteke.
- NBE-CT-79 arauak [61] transmitantzia balio batzuen konplimendua ezartzen zuenez 1981etik geroztik eraikitako eraikinetazako, euren inguratzaileren U-balioak arauak eskatutakoak direla suposatuta daitezke eta, beraz, fidagarritasun handiagoarekin zehaztu.

Horrela, kalibraketa-metodoa hurrengo urratsetan datza, kontsumo-datuak bildutako eraikin bakoitzarentzako errepikatu behar direnak:

- a) Lehenik eta behin, lortutako berokuntza-kontsumoaren datuetatik, etxebizitza bakoitzarentzako urteko kilowatt-orduetan adierazita daudenak, eraikin osoaren berokuntza kontsumoa kalkulatu da, kilowatt-orduetan gainazal unitateko ( $\text{kWh/m}^2$ ). Horretarako, etxebizitza bakoitzaren azalera katastrofik lor daiteke.
- b) Ondoren, eraikina bere aztarna eta ezaugarri geometriko errearen arabera modelatzen da, eta aplikagarriak diren inguratzaileren transmitantzia balioak NBE-CT-79 aruaren arabera esleitzen dira. Berokuntza erabilera-ordutegi ezberdinak definitzen dira, definitutako profil bakoitza eredu sartu eta simulatuz.

- c) Azkenik, lortutako berokuntza-kontsumoaren emaitzen multzoa eraikinaren benetako kontsumoarekin alderatzen da, eta errealitatera gehien hurbiltzen den berokuntza-profila hautatzen da.

### 3.2.1.3 1.3. urratsa: ereduaren balioztatzea

Urrats honen helburua eraikin-arketipoen modelazioaren emaitzak datu enpirikoekin baliozkotzea da, eraikitako ereduaren doitasun eta fidagarritasuna zehazteko.

Hasieran, aurreko analisi eta literaturako emaitzetan oinarritutako baliozkotzea proposatzen da. Datuak erraz eskura daitezkeenez, ikuspegi horrek badu abantaila argi bat: eraginkorra da denborari dagokionez. Hala ere, baliteke literaturak aztertutako hiri zehatzaren errealitate espezifikoak ez islatzea nahitaez. Beraz, aztertutako kokapenarekin lotutako datu enpirikoak biltzen dira baita ere, eraikin-arketipoen modelizazioaren emaitzekin alderatzeko. Alde batetik, etxebizitzaren erregai-kontsumoari buruzko inkesta bat burutzen da. Gainera, erregresio lineal anizkunaren erabilera proposatzen da, etxebizitza-tipologia mota ezberdinen berokuntza eskariak lortzeko modu alternatibo eta osagarri gisa, eraikin-ereduaren baliozkotzea indartzeko. Azkenik, baliozkotzea eskala agregatuan ere egiten da.

#### 3.2.1.3.1 Literatura

Eraikin-arketipoen modelizazioaren emaitzak balioztatzeke, berehalakoa da literaturako informazioa erabiltzea. Etxebizitzaren azken energia-erabileraren araberrako kontsumo banaketari dagokionez, SECH-SPAHOUSEC analisia [62] da ziurrenik Espainian egindako ikerketarik zabalena. Behetik-gorako zenbait metodo konbinatzen ditu, hala nola, telefono zundaketak, in situ egindako inkestak eta tokiko monitorizazioa, energia kontsumo datu errealak biltzeko.

SECH-SPAHOUSEC proiektuak azken energia-erabilera bakoitzari lotutako energia kontsumoa ematen du, Espainia hiru klima-eremutan banatuz (atlantikoa, kontinentala eta mediterraneoak) eta horietako bakoitzean familia bakarreko etxeak eta eraikin blokeak bereiziz. Lan honetan zona atlantikoaren eraikin blokeei dagozkien hurrengo datuak erabiltzen dira erreferentzia gisa:

- Azken energia-erabileraren araberrako etxeko energia-kontsumoaren banaketa.
- Etxebizitzaren batez besteko berokuntza kontsumoa (kWh/m<sup>2</sup>).

#### 3.2.1.3.2 Erregai-kontsumoaren inkesta

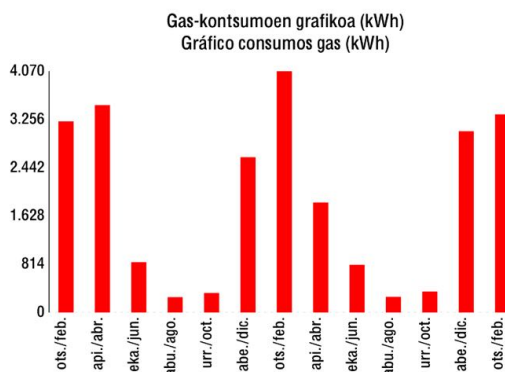
Etxebizitzaren berokuntza eta UBS kontsumoekin lotutako informazio errealak lortzeko, erregai-kontsumoari buruzko inkesta bat egitea proposatzen da. Erregai-kontsumoa erabiltzearen zergatia honekin asetako azken energia-erabilera kopuru murriztua da, bakoitzari dagokion zatia esleitzea errazten duena. Izan ere, etxeetan erregaiak ondorengo hiru erabilera termikoetan baino ezin daitezke erabili: etxebizitzaren berokuntzan, UBSan eta sukaldean. Beraz, berokuntza elektrikoaren sistemak dituzten etxebizitzak alde batera uzten dira inkesta honetan, eta etxebizitza indibidualerako erregai-kontsumoaren informazioa baino ez da biltzen, gas naturala izan daitezkeena edota beste petroleoaren deribatuenak.



### 3.2.1.3.2.1 Datuak biltzeko prozesua

Eraikin-arketipo ereduak balioztatzeko informazio garrantzitsua den arren, inkesta honek dakarren konplexutasuna ez da hutsala. Etxebizitzen energia faktura-datuak informazio pribatutzat hartzen dira askotan, horiek partekatzeko gogo argirik gabe. Gainera, inkesta honi erantzuteak gutxienez urtebeteko epea osatzen duten faktura kopuru jakin bat bildu beharra dakar eta horietariko bakoitzean fakturatutako kontsumoak batzea. Prozesu hau, jakina, neketsua da inkestatuentzako. Ondoren azaltzen den datu-bilketa prozesua eragozpen horiek gainditzera bideratua dago.

Espanian, etxebizitza indibidualen energia fakturek fakturatutako aldiko datuez gain (normalean hilabete bat edo biko epea), azken bi urteetako erregai-kontsumoaren datu historikoak ere adierazten dituzte, grafiko moduan. Hemen proposatutako inkestan, edozein fakturatan agertzen den grafiko horren argazkia soilik eskatzen da. Horrela, inkesta erantzuteko beharrezkoa den denbora murrizten da, bildutako datuen xehetasunean eragin nabarmenik gabe, grafikoaren barrak erraz neurtu baitaitezke.



#### 9. Irudia: energia-fakturetako kontsumo-datu historikoen grafikoa (adibidea).

Aipatutako grafikoaz gain, gainontzeko hiru datu eskatzen zaizkie inkestatuei:

- Etxebizitzaren helbidea, katastrofik etxebizitzaren azalera lortzea ahalbidetzen duena, horrek etxebizitza bakoitzaren urteko berokuntza-kontsumoa normalizatzeko aukera emanez ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ).
- Bizilagun kopurua, UBS kontsumoa estimatzen laguntzen duena.
- Sukalde mota (elektrikoa edo erregai bidezkoa), azken-erabilera horrek erregaiaren urteko kontsumoan eragina duen ala ez jakitea ahalbidetzen duena.

Laburbilduz, erregai-kontsumoari buruzko datu errealak biltzeko beste modu bat aurkeztu da, datuak biltzeko prozesua errazten duena. Proposatutako prozesuak erregai-fakturen edukiaz baliatzen da, ahalegin handirik egin gabe informazioa biltzeko.

### 3.2.1.3.2.2 Laginaren gutxieneko tamaina

Inkesta guztiek akatsen bat dakartzate, lagina populazio estatistiko osoa baino txikiagoa baita. Hain zuzen ere, errore onargarriaren esleipena da beharrezkoa den laginaren gutxieneko tamaina zehazten duena.

Errore onargarri hori bi parametro desberdinen bidez definitu ohi da. Alde batetik, errore-marjina bilatutako balioarentzako espero den kokapen-tartea da. Bestalde, konfiantza-tarteak bilatutako balioa aipatutako errore-marjinaren barruan dagoenaren ziurtasuna adierazten du. Errore-marjina, konfiantza-tartea eta laginaren tamaina estuki lotuta daude. Jakina, errore-marjina murrizten bada edota konfiantza-tartea handitu, beharrezko lagin-tamaina handitu egingo da.

Limiteen Teorema Zentralak frogatzen du, baldintza orokorretan, zorizko aldagai askeen batura banaketa normal – kanpai kurba gaussiar – batera hurbiltzen dela, aipatutako batura nahikoa handia denean. Teoremaren honen arabera, laginaren batez besteko balioa ebaluatutako populazioaren batez besteko balio probablenera izango litzateke, horretatik urrundu ahala bere probabilitatea banaketa gaussiar baten arabera murriztuz. Hori dela medio, laginaren tamaina 13. ekuazioaren bidez kalkula daiteke:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot \sigma^2}{(N - 1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot \sigma^2} \quad (13)$$

Non  $n$  laginaren tamaina den,  $N$  populazioaren tamaina,  $Z$  konfiantza-tartea bermatzeko batez besteko balioarekiko desbideratze onargarria (beharrezkoa den konfiantza-tartearen arabera,  $Z$ -rentzako balioa banaketa gaussiarrak emango luke),  $e$  gehieneko errore-marjina eta  $\sigma^2$  populazioarentzako espero den bariantza. Azken hau zehazteko ohiko metodoa lagina biltzen hastea da eta, jasotako lagin kopurua nahikoa denean, behin-behineko lagina honen bariantza kalkulatzeko.

Populazioaren tamaina behar bezain handia denean, 14. ekuazio sinplifikatua erabil daiteke laginaren tamaina kalkulatzeko, 13. ekuazioaren orde. Bi formulak emaitza bera ematen dute.

$$n = \frac{Z^2 \cdot \sigma^2}{e^2} \quad (14)$$

Lan honetan, populazioa aztertutako hiriaren etxebizitzek osatuko lukete hertsiki. Hala ere, datu-bilketa are gehiago errazteko, aztertutako hiria inguratzen duten udalerrak edota probintzia osoa ere sar litezke inkestan eta, horrela, horien laginak ere baliagarriak izango lirateke, datuak jasotzeko aukera gehiago eskainiz. Hau egin ahal izateko baldintzak udalerriz guztiek antzeko baldintza klimatikoak eta eraikuntza-ezaugarriak izatea dira, eta populazioa aztertutako hiriaren etxebizitza-parketik probintzia osoko bizitegi sektorera aldatzen den arren, 14. ekuazioak adierazten duenez populazioko tamaina jakin batetik gora laginaren gutxieneko tamaina ez dago populazioaren mende. Horrela, aztertutako hiriari ez ezik, inkestan emaitzak udalerriz guztiei ere esleitu dakioko.

### 3.2.1.3.2.3 *Bildutako datuen azterketa*

Inkestan bildutako datuak aztertuz, hurrengo balioak lortzen dira:

- Etxebizitzaren berokuntzako urteko batez besteko energia-konsumoa ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ). Hala, literatura analisiaren urratsean bildutako berokuntza kontsumoa balioetsi daiteke.
- UBS litroen batez besteko kontsumoa eguneko eta pertsona bakoitzeko. Honek UBSren kontsumo-maila errealean sakontzea ahalbidetzen du, eta baita literatura

analisiaren urratsean ebaluatutako azken energia-erabileraren araberako kontsumo banaketa berrestea.

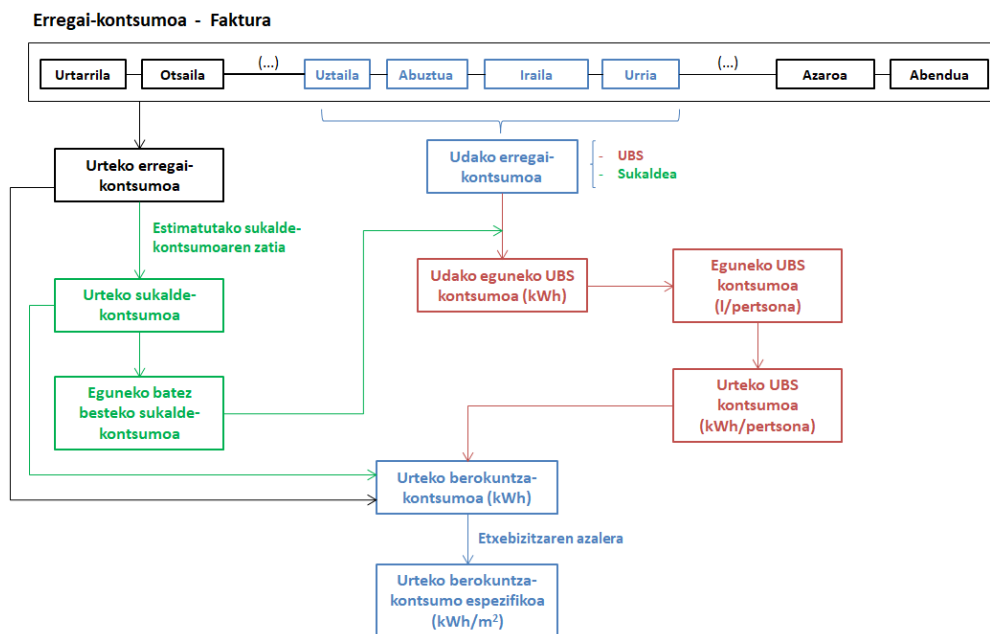
Helburu hauek lortzeko, bi ikuspegi osagarri ezberdin aplikatzen dira.

- Lehenengo metodoa, 10. Irudian azaltzen dena, udako erregai-kontsumoa erabiliz estimatutako UBS kontsumoan oinarritzen da, udan berokuntzarekin lotutako erregai-erabilerarik ez dagoela suposatuz.

Udari dagozkion erregai-fakturak uztaila, abuztua, iraila eta urrikoak direla kontsideratzen da. Lau hilabete osoak kontsideratzen dira, denbora tarte luzeagoa kontuan hartzeko eta oporraldiak energia kontsumoan izan dezakeen eragina txikiagotzeko.

Erregai kontsumoa kontuan hartutako denbora tartearen egunekin eta biztanle-kopuruarekin zatituz, pertsona bakoitzak egunean kontsumitzen duen UBS kantitatea lortzen da, kWh-tan. Erregai bidezko sukaldeak duten etxebizitzaren kasuan, udako erregai-kontsumoari sukaldeko azken erabilerari dagokion kontsumo zatia kendu behar zaio lehenbizi. Horretarako, literaturak sukalde erabilerari esleituriko kuota urte osoko erregai-kontsumoari aplikatzen zaio. Ondoren, zati 365 egun eginez, sukaldeari dagokion eguneko erregai-kontsumoa estimatzen da.

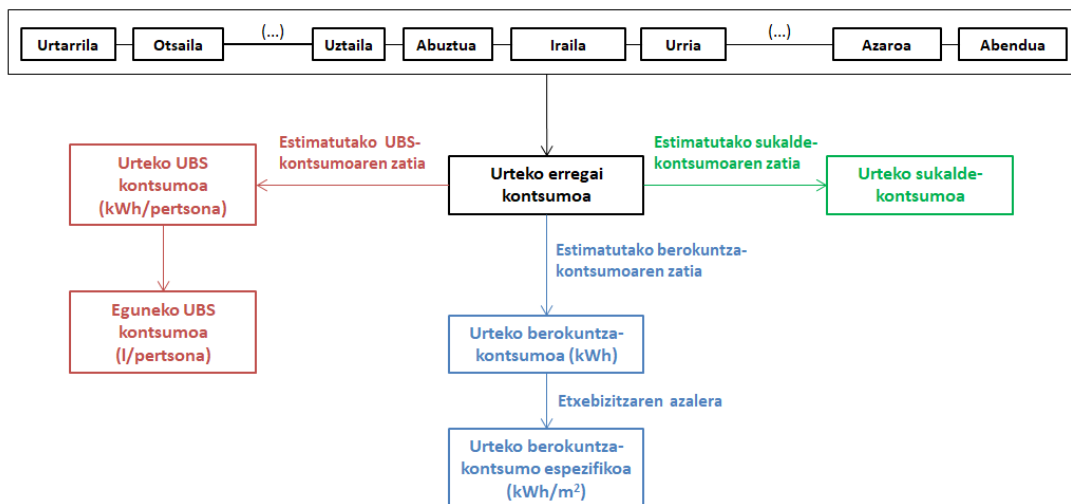
kWh unitatetan lortutako pertsona eta eguneko UBS kontsumoa litroetara pasatzeko, aztertutako hiriko sareko uraren batez besteko tenperatura erabiltzen da, udako batez besteko tenperaturari hurbildu daitekeena. Ura 60°C-tara berotzen dela kontsideratzen da. Ondoren, pertsona eta eguneko litroak erabiliz, urteko UBS kontsumoa estimatzen da, tokiko urteko batez besteko tenperatura sareko uraren tenperatura gisa erabiliz. Azkenik, sukaldeari eta UBS-ari lotutako kontsumo-kuotak urteko erregai-kontsumo osoari kenduta, berokuntzarekin lotutako urteko kontsumoa lortzen da.



10. Irudia: udako UBS kontsumoaren estimazioan oinarritutako datuen azterketa.

- Bigarren ikuspegia, funtsean, etxe-erabileren araberako erregai kontsumoaren batez besteko banaketan oinarritzen da, literatura-analisiaren urratsetik datorrena. Prozesua 11. Irudian laburbiltzen da.

**Erregai-kontsumoa - Faktura**



**11. Irudia: etxe-erabileren araberako erregai kontsumoaren banaketan oinarritutako datuen azterketa.**

Bi ikuspegietako emaitzak alderatu egiten dira, antzekoak direla konprobatzeko. Konparaketa hori modu berezian egin liteke, laginetik lortutako berokuntza-kontsumoaren edo UBSren datu guztiak grafikatu. Gainera, lortutako berokuntzaren eta UBSren batez besteko energia-kontsumoak konparatzen dira.

Azkenik, garrantzitsua da deskribatutako prozeduraren oinarri diren hipotesiak egiaztatzea, hau da, laginak banaketa normala jarraitzen duela eta baita laginaren gutxieneko tamaina kalkulatzeko aurreikusitako bariantza balioa ere. Emaitzak histogrametan grafikatu, bildutako laginaren normaltasuna egiazta daiteke.

**3.2.1.3.3 Erregresio lineal anizkoitza**

Atal honetan, etxebizitza mota ezberdinen berokuntza-eskaerak lortzeko proposatzen den behetik gorako erregresio estatistikoaren metodoa deskribatzen da, kontsumo errearen datuetan oinarritutakoa eta eraikin-arketipoen ereduen emaitzak balioztatzen lagun dezakeena.

**3.2.1.3.3.1 Erregresio lineal anizkoitzaren oinarriak**

Erregresio lineal anizkoitza modelizazio estatistikoko teknika bat da, menpeko aldagai baten ( $y$ ) eta aldagai aske bat baino gehiagoren ( $x_i$ ) arteko eredu linealak doitzeko erabiltzen dena. Helburua, beraz, ekuazio-sistema bateko  $b_i$  koefizienteak lortzea da,  $j$  kasu bakoitzeko hurrengo itxurako ekuazioz osatuta dagoena.

$$y_j = b_0 + b_1 \cdot x_{1j} + b_2 \cdot x_{2j} + b_3 \cdot x_{3j} + \dots + b_n \cdot x_{nj} + u \quad (15)$$

non  $u$  ausazko termino edo perturbazioa den, eredian sartu gabeko aldagaiek eragindako efektuak edota ausazko eraginak adierazten dituen.  $b_i$  koefizienteak behatutako eta aurreikusitako balioen arteko diferentzien karratuen batura minimoa izan dadin definitzen

dira, hondar-bariantza minimizatuz. Ekuazio-sistemaren ebazpena notazio matrizialean dagoen 16. ekuazioak ematen du.

$$b = (X'X)^{-1}X'y \quad (16)$$

non  $b$  estimatutako koefizienteen bektorea den,  $y$  menpeko aldagaien balioen bektorea eta  $X$  aldagai askeen matrizea. Ekuazioa erraz ebatzi daiteke software matematikoekin. Lan honetan Matlab programa erabili da.

$R^2$  determinazio-koefizienteak erregresio-ereduak azaltzen duen mendeko aldagaiaren bariantzaren ehunekoak zehazten du. 0,6 – 0,8 bitarteko balioa egokitzat hartzen ohi da.

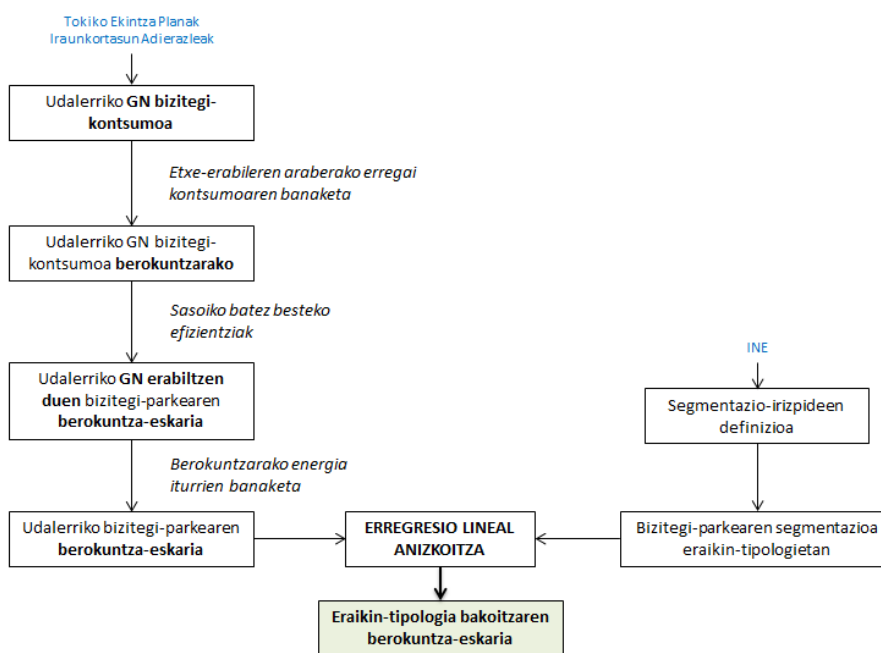
### 3.2.1.3.3.2 *Proposatutako prozesua*

Literaturan eraikuntza parkeen energia kontsumoa kalkulatzeko posta-kode mailako kontsumo-datu agregatuak erabiltzen dituzten zenbait ikerketa aurki daitezke [23][24]. Beraz, analisi horien esparrua hiri-eskala da. Hala ere, Espainian ez da ohikoa posta-kode mailako kontsumoak publikoki eskuragarriak egotea, eta horrek zaila egiten du aurreko planteamendua aplikatzea. Horren ordez, metodologia honek erregresio teknika eskualde-eskalan aplikatzea proposatzen du, udal-mailako kontsumo balio agregatuak erabiliz.

Agenda 21eko testuinguruan udalek ezarritako Tokiko Ekintza Planek (TEP) zenbait Iraunkortasun Adierazleren erabilera bultzatzen dute, plan horien jarraipena eta ebaluazioa egin ahal izateko. Adierazle horietako batzuk udalerriko energia-kontsumoarekin erlazionatuta daude, sarritan gas natural kontsumoa barne hartuz. Proposatutako prozedurak datu horietaz baliatzen da erregresio lineal anizkoitza aplikatzeko. Zentzu honetan, bi aspektu hartu behar dira kontuan:

- Gas naturala etxeko berokuntza-eskaria ez ezik, etxeko beste erabilera termiko batzuk asetzeko ere erabiltzen da, hala nola, UBS eta sukaldea.
- Udallerri baten etxebizitzaren berokuntza-eskaria gas naturalarekin ez ezik, beste energia-iturri eta erregai batzuekin ere asetzen da, hala nola elektrizitatea, GLP edo gasolioa.

Beraz, Iraunkortasun Adierazleetatik lortutako gas natural bizitegi-kontsumo municipalen datuak jorratu egin behar dira lehenbizi, 12. Irudian adierazitako prozesua jarraituz, erregresioan erabili beharreko balioak lortzeko, hau da, udallerri ezberdinen etxebizitza-parkeen berokuntza-eskaera agregatuak. Horretarako, SECH-SPAHOUSEC analititik lortutako azken energia-erabilerei lotutako erregai-kontsumoaren banaketa, IDAEk berokuntza sistemarako proposaturiko sasoiko batez besteko efizientziak [54] eta INEk adierazten duen berokuntzarako energia-iturrien distribuzioa [50] erabiltzen dira.



## 12. Irudia: erregresioan sartu beharreko datuen prestaketa-prozesua.

Izan ere, planteamendu honetan erregresioaren aldagai askeak udalerrri ezberdinen etxebizitza-parkeen berokuntza-eskaera agregatuak dira, parkearen azalera osoarekin normalizatuta ( $\text{kWh/m}^2$ ).  $X_i$  aldagaiak etxebizitza-mota bakoitzaren azalaren zatia dira (%), udalerriko parkearen azalera osoarekiko. Lortu nahi diren  $b_i$  koefizienteak, beraz, etxebizitza-mota bakoitzaren berokuntza-eskaera izango lirateke, gainazal unitateko. Idealki, erregresioan sartu beharreko etxebizitza-motak lan honetan modelatutako eraikin-arketipoen berdinak izan beharko lirateke, zeinen berokuntza-eskaerak balioztatu nahi diren. Hala ere, erregresioan erabili daitezkeen etxebizitza-mota kopurua, eskuragarri dauden udal kontsumo-datu kopuruak mugatzen du. Zenbat eta kontsumo datu gehiago, orduan eta sakonagoa izango da erregresioak onartzen duen etxebizitza-moten sailkapena.

Bestalde, kontuan izan behar da horrelako metodo estatistikoaren aplikazioaren helburua etxebizitza-mota ezberdinen energia-eskaria lortzea dela, kokapen zehatz batean eta, beraz, baldintza klimatiko batzuentzako. Beraz, metodo hau hiri-mailatik goragoko eskala batean aplikatzeak hurrengo koherentzia-baldintzak mantentzera behartzen du, egiaztatu behar direnak:

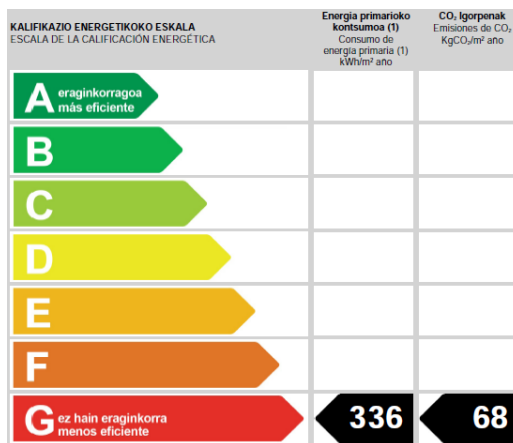
- Baldintza klimatikoak antzekoak izan behar dira erregresioan sartutako udalerrri guztietan. Beraz, gradu-egun ezberdineko udalerrriak kontuan izateak ez luke koherentziarik izango.
- Udalerrri guztiek antzeko etxebizitza-motak izan behar dituzte, analisisan sartutako etxebizitza-moten multzoa udal-parke osoaren zati esanguratsua izanik.

### 3.2.1.3.4 Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagirien Ebaluazioa

Atal honen xedea Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagirien (EEZ) aplikagarritasuna aztertzea da, eraikinen energia-ereduen emaitzak balioztatzekeko modu osagarri gisa. Egun, etxebizitzak

saltzeko edo alokatzeko ezinbesteko betekizuna da ziurtagiria izatea eta, ondorioz, EEZ horiek datuen iturri zabal eta interesgarri bihurtu dira.

EEZen erregistroa Eusko Jaurlaritzaren Ekonomiaren Garapen, Jasangarritasun eta Ingurumen Sailaren web orrian aurki daiteke [63]. EEZ osoaren orde, datu-base horrek etxebizitza bakoitzaren eraginkortasun energetikoaren azken etiketa eskaintzen du, 13. Irudian adierazitakoaren modukoa. Ondoren azaldutako ikerketa etiketa horien analisisan oinarritzen da.



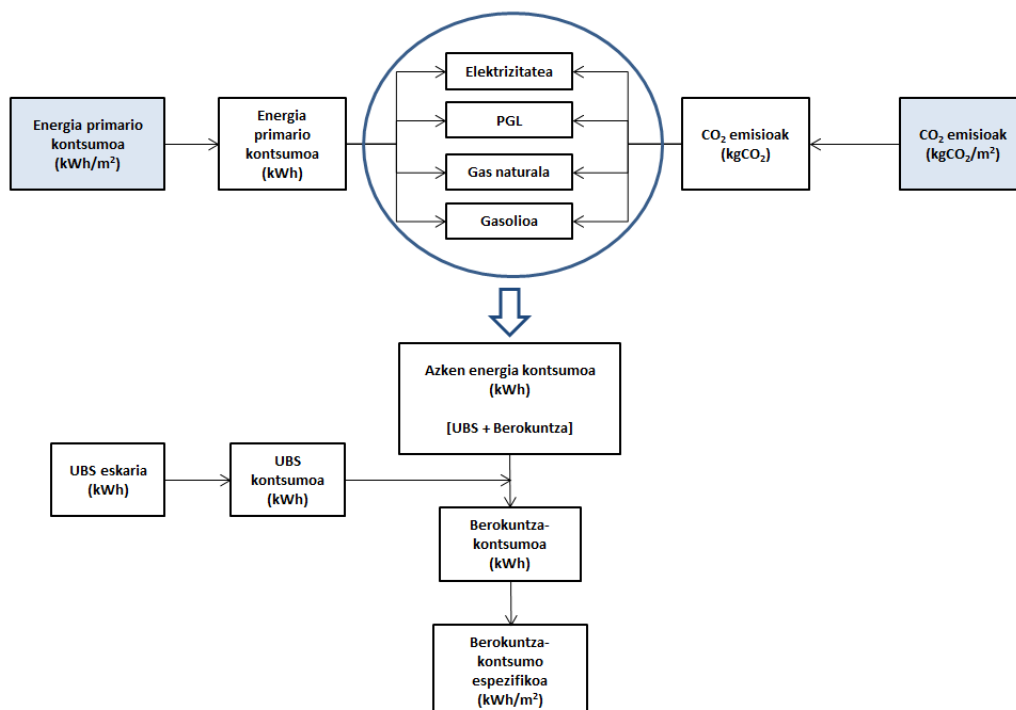
13. Irudia: jasotako eraginkortasun energetikoaren etiketen adibidea.

Espainiako energia eraginkortasunaren ziurtapenak historikoki CO<sub>2</sub> emisioak izan ditu adierazle nagusi gisa. Hasieran, 93/76/CEE Zuzentarauaren ondorioz, CO<sub>2</sub> emisioak mugatzearekin lotua zegoena. Ondorengo 2002/91/CE Zuzentarauak ez zuen esplizituki zehaztu eraginkortasuna neurtzeko zein adierazle erabili. Aurrerago, 2010/31/UE Zuzentarauak lehengo aldiz EEZ-etan Energia Primarioaren (EP) adierazlea ere erabiltzearen betekizuna ezarri zuen.

Gaur egun EEZen etiketetan agertzen diren bi balio horietaz, CO<sub>2</sub> emisioak eta EP kontsumoa, baliatzen da aurkeztutako metodoa. Espainian jarraitutako energia ziurtapen prozedurari jarraiki, etxebizitzaren kasuan balio horiek berokuntzaren, hozketaren eta UBSren azken erabilerei dagozkie, eta baita energia berriztagarrien bidezko autokontsumoari (hemen aipatuko ez dena). Azterketa honetan hozketaren azken erabilera alde batera uzten da eta, beraz, metodo hau hozketa hutsala den lekuetan baino ez lizateke aplikagarria izango.

14. Irudiak burututako azterketa laburbiltzen du, non eraginkortasun energetikoaren etiketetako balioak urdinez adierazten diren.

Eraginkortasun energetikoaren etiketetako datuak etxebizitzako azaleraren metro karratuko daude adierazita. Beraz, lehenbizi, katastrofik ateratako etxebizitzaren azalera erabiliz, urteko EP kontsumo totala eta urteko CO<sub>2</sub> emisio totalak kalkula daitezke.



**14. Irudia: etiketatik lortutako balioetatik berokuntza-kontsumoak estimatzeko definitutako metodoa.**

Ondoren, aztertutako etxebizitzari zein erregai dagokion aztertu da. CE3, CE3X eta “Herramienta unificada LIDER-CALENER” (HULC) ziurtapen programek erabiltzen dituzten azken energiako konbertsio faktore berak hartu dira kontuan, zeinak gasolioari, PGLri, gas naturalari eta elektrizitateari dagozkien. 5. Taulak konbertsio-faktore horiek laburbiltzen ditu. CTE-rekin eta RITE-rekin beharrezkoa den koherentziak bultzatuta, biak 2013an eguneratuak, Espainiako eraikinen eraginkortasun energetikoa ziurtatzeko prozedura eguneratu behar izan zen. Horrela, 2016ko urtarrilean 5. Taulako konbertsio-faktoreak aldatu egin ziren eta berriak aplikatzen hasi [64]. Halere, lan honetan aztertu diren energia-etiketa guztiak aitzineko ziurtapen prozedura indarrean zegoenekoak dira eta, ondorioz, hemen bildutako faktoreak aplikatu behar dira.

**5. Taula: erregai bakoitzaren konbertsio-faktoreak.**

|                       | $kWh_{EP}/kWh_{EF}$ | $kgCO_2/kWh_{EF}$ |
|-----------------------|---------------------|-------------------|
| <b>Gasolioa</b>       | 1,08                | 0,287             |
| <b>PGL</b>            | 1,08                | 0,244             |
| <b>Gas naturala</b>   | 1,01                | 0,204             |
| <b>Elektrizitatea</b> | 2,61                | 0,649             |

Urteko CO<sub>2</sub> emisioei eta EP kontsumoari konbertsio-faktoreak aplikatuz, erregai bakoitzarekin bi modutara lortzen da etxebizitzako azken energia kontsumoa. Hurrengo arrazoibidea jarraitzen da.

- Azken energia kontsumoen balioen arteko alderik txikiena ematen duen erregaia hautatzen da.



- Gutxieneko alde hori onargarria ahal bada, suposatzen da azken erabilerak (hau da, UBS eta berokuntza), hautatutako erregaiarekin asetzen direla eta energia kontsumoaren azken balioa hori ontzat ematen da (hemen, alde txikiak beti egongo direla izan behar da kontuan; adibidez, energia-etiketako balioen biribiltzea dela-eta).

Baliteke kasu batzuetan lortutako azken energia kontsumo balioen aldea handia izatea. Hainbat arrazoirengatik izan daiteke hori. Hainbat sistema edo erregai egoteagatik UBSrako eta berokuntzarako, edota energia berriztagarriek asetzen duten eskaera energetikoko zati bat existitzeagatik. Kasu horiek azterketatik kanpo uzten dira.

Bestalde, UBSren eskaera “*Documento de condiciones de aceptación de Programas Informáticos Alternativos*” dokumentuaren arabera kalkulatzen da [65], metro karratuko 0,03 pertsonako okupazioa eta eguneko 22 litro UBS *per capita* kontsumoa suposatuz. UBS-a 60°C-ra berotzen dela onartu daiteke, eta urteko batez besteko sarrera temperatura zona klimatikoari dagokiona. Horrela, urteko UBSren energia-eskaera lortzen da.

Dagokion kontsumoaren balioa kalkulatzeko, etxebizitzek berokuntzarako eta UBS-rako sistema bera erabiltzen dutela suposatzen da, eta sistema hori banakakoa dela. Hori dela medio, 6. Taulako sasoiko batez besteko efizientziak aplikatzen dira.

6. Taula: banakako sistemen sasoiko batez besteko efizientziak [54].

| Sasoiko batez besteko efizientziak – Banakako sistemak |     |
|--|-----|
| Gasolioa   | %75 |
| PGL  | %75 |
| Gas naturala   | %70 |
| Elektrizitatea   | %99 |

UBSri dagokion kontsumoa kenduta, berokuntzari dagokion azken energia kontsumoa kalkulatzen da.

### 3.2.1.3.5 Maila agregatuzko balioztatzea

Aurreko urratsak modelatutako eraikin-arketipoen berokuntza eskariak modu berezian balioestera bideratuta daude, eta eraikin-mailako balioen konparazioan oinarritzen dira. Hala ere, erregresio-analisan erabilitako datuak hiri-mailako balioztatze agregatu baterako ere erabil litezke.

Izan ere, deskribatutako erregresioak udalerrri ezberdinen etxebizitza-parkeen berokuntza-eskari agregatuak erabiltzen ditu sarrerako datu gisa, horien artean aztertutako hiriarri dagozkion balioak daudelarik. Beraz, balio hauek modelatutako eraikin-arketipoen emaitzen balioztapen agregatu bat burutzeko erabil daitezke, arketipo bakoitzaren emaitza bizitegi-parkean duen pisuaren arabera agregatuz.

Halaber, Bilboko TEPearen agertzen den informazioa osatzeko eta, horrela, hiriaren bizitegi-sektorearen gas natural kontsumoaren bilakaera historikoari buruzko informazio gehiago

lortzeko, Udaleko Ingurumen Saila kontaktatu da. Bere laguntzari esker, 2004-2017 aldiko kontsumo bilakaera osoa bildu eta horrekin, erregresiorako azaldu den prozesua jarraituz, bizitegi-sektoreko berokuntza-eskaria estimatu egin da.

### **3.2.2 Birgarren fasea: energia-jardueraren kostu-maila optimoaren kalkulua**

#### **3.2.2.1.1 Aplikaturako metodologiaren irismena**

Tesi honek kostu-maila optimoaren metodologia hiri-mailan aplikatzea proposatzen du. Eskala horrek estatu-mailakoa baino txikiagoa den eraikin heterogeneotasun bat eskaintzen du, eta eraikuntza-ezaugarrien azterketa sakonagoa egiteko aukera ematen du.

Proposaturiko metodologia Bilbo hiriarri aplikatu zaio, lehenengo fasean modelaturako 17 eraikin-arketipoak erreferentziatzeko eraikin gisa erabiliz. Eraikin-arketipo horien ezaugarriak II. eranskineko II.23. taulan laburbiltzen dira. Bizitegi-sektore osoa ordezkatzen duten arketipo horiei, energia-eraginkortasuneko neurri ezberdinak aplikatu zaizkie.

Azterketaren kalkulu-aldia 28 urtekoa izan da, 2022an hasi eta 2050ean amaitzen dena, ekonomia deskarbonizatzeke Europako helburua lortu beharreko unea.

Atal honetan burututako analisiaren irismena deskribatzen da.

##### **3.2.2.1.1.1 Sistemen erabilera eta kudeaketa**

Eraikin bateko energia-kontsumoa zehazten duten faktoreen artean, eraikinaren energia-sistemen erabilera eta kudeaketa daude. Energia-eraginkortasunaren ikuspegitik, erabilera hori arrazionalizatzea sustatu beharrezko lehenengo ekintza kontsideratzen ohi da, eta horrek eragin nabarmena izan dezake eraikinaren energia-eskaeran.

Kudeaketa-sistema inteligenteak sustatzeaz aparte, energia-sistemen erabileran eta kudeaketan eragiteko moduek ez dute izaera teknikoa. Hain zuzen ere, erabiltzaileen kemena da beharrezkoa, efizienteagoak izateko, eta hori heziketa eta sentsibilizazio ekintzen bidez sustatu beharra dago.

Zentzu honetan, zaila da energiaren erabilera eta kudeaketa eraginkorrago batek energia-kontsumoan izan dezakeen eragina kuantifikatzea, eta ez da bizitegi-sektorearentzako horrelako kalkulurik topatu. Eskuragarri dagoen informazio bakarra GTRk administrazio eta hezkuntza eraikinentzako estimatutako %10ko kontsumo murrizketa da [21].

Halaber, eraikin-arketipoen modelizazio eta simulazioan, azaldu den bezala, erabiltzaile arrazional baten batz besteko portaera bat kontsideratu da, berokuntza-sistemen erabilera-profilei dagokienez. Beraz, lan honetan ez litzateke egokia izango aipaturiko arrazionalizazio energetikoak ebaluatzeak, eta baztertu egiten dira. Horrenbestez, birgaitze neurri-pakete ezberdinei dagozkien energia-kalkulu guztiak eraikinaren barne-baldintza berberekin burutzen dira.

##### **3.2.2.1.1.2 Aztertutako azken energia-erabilerak**

Etxeko elementu askok, hala nola etxetresna elektrikoek eta argiztapenak, erabiltzen diren ordu-kopuruarekiko proportzionala den energia-kontsumoa dute, berezko energia-

eraginkortasunarekin ere lotuta dagoena. Horien erabilera optimotik hurbil dagoela jotzen bada edo, gutxienez, erabilera hori saihestezina dela, energia-kontsumoa murrizteko modu bakarra eraginkortasuna hobetzea da, egungo ekipoaren ordeztu eraginkorrago bat jarritz.

Oro har, ekipo hauek berritzeak ez du operazio konplexurik eskatzen, ekipo zaharra deskonektatu eta berria konektatzearekin nahikoa da. Halaber, etxetresna elektrikoek eta argiztapenaren ordeztapenak ekonomikoki oso bideragarriak frogatu dira, amortizazio-aldia laburra delarik. Gainera, ekipo horien ordeztapena euren bizitza erabilgarriaren amaieran baino ez dela burutzen suposatzen bada ere, epe-luzean erabat berrituko direla kontsidera daiteke. Beraz, kostu-maila optimoaren metodologiaren aplikazio honek ez ditu etxeko tresnen eta argien hobekuntza energetikoak kontuan hartzen, datozen urteetan zehar derrigorrez gertatuko baitira.

Bestalde, Bilboko baldintza klimatikoetan hozte-eskaria baztergarria da. Beraz, burututako analisiak berokuntzaren eta UBS kontsumoaren azken energia-erabilerak hartzen ditu kontutan.

### 3.2.2.1.1.3 Kalkulu-prozesu orokorra

Kostu-maila optimoaren metodologiak eraikin bati hornitutako Energia Primarioa (EP) baino ez du kontuan hartzen eta, beraz, tokiko energia berriztagarri ekoizpena alde batera uzten du. Aldi berean, CTEk eraikinentzako ezartzen duen EP kontsumo maximoak tokiko energia berriztagarri hori barne hartzen du. Beraz, balio horiek ez dira alderagarriak. Hala, kostu-maila optimoaren metodologiaren emaitzak Espainiako araudiak ezarritako EP atalaseekin alderatzeko, EP ez-berriztagarriaren (EP-eb) kontsumoa erabili da adierazle gisa, azken honetarako ere muga-balioak definitzen baititu CTEk. Bilboko zona klimatikorako, CTEk 32 kWh/m<sup>2</sup>-urte-ko muga – NZEB maila – ezartzen du eraikin berrietarako.

Halaber, soluzio tekniko ugari daude UBSko eta berokuntzako energia-kontsumoa murrizteko; beraz, birgaitze aukeren konbinazioa oso zabala izan daiteke. Análisi honetan eraginkortasun energetikoko neurri (EEN) posibleen arrazoizko multzo bat kontsideratu da, ez duena osoa edota itxia izan nahi. Hautatutako EENak gaur egungo praktika hedatuetan oinarritzen dira, teknikoki bideragarriak direla eta eraikin askotan aplikatu daitezkeela egiaztatzen direnak.

Esku-hartzeek hiru helburu nagusi dituzte: berokuntza-eskaria murriztea, beharrezkoa den energia modu eraginkorragoan hornitzea eta energia berriztagarrien ekarpena handitzea. Horrela, EP-eb kontsumoan duten eragina ebaluatzeko, lau pausuko prozedura burutu da:

- Lehenik eta behin, berokuntzako energia-eskaria kalkulatu da, Design Builder softwarean eraikin-ereduak simulatuz. Bestalde, UBS energia-eskaria metodologiaren lehenengo faseko erregai-kontsumo inkestaren emaitzen arabera estimatu da.
- Ondoren, eskari horieri dagozkien azken energia-kontsumoak kalkulatu dira, horiek asetzeko sistemen sasoiko batez besteko efizientziak aplikatuz.
- Energia berriztagarriko sistemen ekoizpena SAM softwarearekin [34] egin da.
- Azkenik, EP-eb kontsumoa kalkulatu da, azken energia-kontsumoari dagozkien igarotze-faktoreak aplikatuz eta energia berriztagarrien ekarpenak eraziz.

### 3.2.2.1.2 Berokuntza eta UBS sistemak

EEEren arabera [66], Euskadin ohikoa da UBS ekoizteko sistemak berokuntza sistemarekin bat egitea. Beraz, berokuntza-sistema kolektiboa zein banakakoa izan, etxebizitzek normalean sistema bera erabiltzen dute UBSa hornitzeko.

Antzeko ondorio bat atera daiteke SPAHOUSEC II proiektuaren emaitzetatik [67], Ipar Atlantikoko zona klimatikoan dauden berokuntza eta UBS sistemen distribuzioari dagokionez. Horien arabera, apartamentu-blokeetan kokatutako etxebizitzek %67,4k berokuntza espazialerako galdara bat (konbentzionala edo kondentsaziozkoa) erabiltzen dute, eta %28,1k sistema elektrikoren bat. UBSren ekoizpen-sistemari dagokionez, etxebizitzek %68,6k galdara erabiltzen dute, eta beste %18,2k sistema elektrikoa; %10,7k, berriz, gas naturaleko termoak erabiltzen dituzte. Beraz, ondorioztatu daiteke berokuntzako sistema elektrikoa erabiltzen duten etxebizitzek zati batek gas naturala erabiltzen duela UBS ekoizteko erregai gisa. Hala ere, berokuntzarako eta UBSrako erregai eta sistema desberdinak erabiltzen dituzten etxebizitzek proportzioa itxuraz txikiagoa izaten jarraitzen du.

Horren ondorioz, lan honetako erreferentziazko eraikinetan, etxebizitzek UBSren ekoizpen-sistema berokuntza-sistemaren berdina kontsideratzen da, eta INEren azken honen distribuzioari buruzko estatistiken arabera zehazten da. Alde batetik, 2011ko Biztanleria eta Etxebizitza Erroldak etxebizitzek berokuntza-sistemak sistema kolektiboetan, banakako sistemetan eta berokuntza-gailu independenteetan banatzen ditu [50], baina ez du sistema horiek erabilitako erregaiari buruzko informazioa ematen. Hori lortzeko, aurreko errolda, 2001. urteari dagokiona, aztertu behar da. Errolda horretan, berokuntzan erabilitako erregaiak gas naturalean, elektrizitatean eta petrolioaren eratorrietan (gasolioan) banatzen ditu, baztergarriak diren beste batzuen artean (besteak beste, zura).

Bestalde, Euskadin gas naturala askoz gehiago erabiltzen da banakako berokuntza-sistemetan berokuntza kolektiboko sistemetan baino. Gasolioa, berriz, sistema zentralizatueta erabiltzen ohi da [66]. Hori dela medio, hipotesi hauek ezarri dira modelatutako eraikin-arketipo bakoitzarentzako berokuntza-sistema motarekin eta kontsumitutako erregaiarekin lotutako datuak gurutzatzean.

- Banakako berokuntza-gailuak elektrikotzat hartzen dira.
- Berokuntzarako energia elektrikoa erabiltzen duten gainerako etxebizitzek berokuntza-sistema indibidualak dituztela kontsideratzen da.
- Gas naturalezko sistemak banakakoak edo kolektiboak izan daitezke. Beraz, gas naturalezko banakako sistemak dituzten etxebizitzek proportzioa hurrengo bi balioen artean txikiena dela jotzen da:
  - Gas naturala kontsumitzen duten etxebizitzek kuota.
  - Aldez aurretik estimatutako berokuntza-sistema indibidual elektrikoak dituzten etxebizitzek zatia kenduta, banakako berokuntza-sistemak dituzten etxebizitzek gainerako zatia.
- Gas naturala erabiltzen duten gainerako etxebizitzek berokuntza sistema kolektiboak dituztela suposatzen da.

- Berokuntza sistema kolektiboak dituzten gainerako etxebizitzek gasolioa kontsumitzen dutela jotzen da.
- Berokuntzarako gasolioa erabiltzen duten gainerako etxebizitzek sistema indibidualak dituztela kontsideratzen da.

Hipotesi hauetan oinarrituz 7. Taula lortu da, Bilboren kasuan identifikatutako etxebizitza adierazgarri bakoitzaren berokuntza eta UBS ekoizpen-sistemen banaketa gisa.

7. Taula: Bilboko etxebizitza adierazgarri bakoitzaren berokuntza eta UBS ekoizpen-sistemen banaketa.

| Etxebizitza adierazgarria <sup>3</sup> | Banakako berokuntza gailuak | Sistema indibidual elektrikoa | Gas naturalezko sistema indibiduala | Gasoliozko sistema indibiduala | Gas naturalezko sistema kolektiboa | Gasoliozko sistema kolektiboa |
|--|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 1. EA                                  | %46,2                       | %13,0                         | %36,0                               | %4,8                           | %0,0                               | %0,0                          |
| 2. EA                                  | %30,5                       | %16,9                         | %47,3                               | %3,6                           | %0,0                               | %1,7                          |
| 3. EA                                  | %32,7                       | %20,3                         | %39,7                               | %5,7                           | %0,0                               | %1,5                          |
| 4. EA                                  | %23,1                       | %15,4                         | %52,8                               | %0,1                           | %0,0                               | %8,5                          |
| 5. EA                                  | %2,3                        | %22,7                         | %55,2                               | %0,0                           | %6,3                               | %13,5                         |
| 6. EA                                  | %0,0                        | %11,4                         | %43,4                               | %0,0                           | %24,4                              | %20,8                         |
| 7. EA                                  | %45,4                       | %10,4                         | %41,3                               | %1,1                           | %0,0                               | %1,8                          |
| 8. EA                                  | %24,1                       | %16,5                         | %46,3                               | %0,0                           | %2,1                               | %11,0                         |
| 9. EA                                  | %35,7                       | %2,8                          | %51,7                               | %0,9                           | %0,0                               | %8,9                          |
| 10. EA                                 | %20,5                       | %13,3                         | %36,1                               | %0,0                           | %10,2                              | %19,9                         |
| 11. EA                                 | %2,3                        | %12,2                         | %8,4                                | %0,0                           | %30,0                              | %47,1                         |
| 12. EA                                 | %35,0                       | 33,4                          | %20,5                               | %1,5                           | %0,0                               | %9,6                          |
| 13. EA                                 | %15,8                       | %4,0                          | %33,5                               | %3,6                           | %0,0                               | %43,1                         |
| 14. EA                                 | %2,7                        | %8,7                          | %13,4                               | %0,0                           | %20,1                              | %55,1                         |
| 15. EA                                 | %3,8                        | %17,1                         | %64,8                               | %0,0                           | %0,0                               | %14,3                         |
| 16. EA                                 | %0,0                        | %18,4                         | %55,5                               | %2,6                           | %0,0                               | %23,4                         |
| 17. EA                                 | %0,0                        | %10,2                         | %21,9                               | %0,0                           | %22,2                              | %45,8                         |

Ikus daiteke sistema kolektiboak garrantzitsuak direla zenbait etxebizitza adierazgarritan, hala nola 6, 11, 13, 14 eta 17.etan. Hala ere, argazki orokorrari erreparatu gero, gas natural bidezko berokuntza-sistema indibidualak dira ohikoenak, etxebizitza guztien %40,9 osatuz. Ondoren, sistema elektrikoek etxebizitzaren %34,8 osatzen dute, berokuntza-gailuak eta banakako sistemak biak batera kontuan hartuz.

### 3.2.2.1.3 Erreferentziatzko eraikinak

Aurreko analisian oinarrituta, 17 eraikin-arketipoetako bakoitza bi erreferentziatzko eraikin (EE) ezberdinetan banatzen da:

<sup>3</sup> Bilborentzat definitutako 17 etxebizitza adierazgarrien eta hauek sorturiko 17 eraikin-arketipoen ezaugarri nagusiak II. Eranskineko II.7. eta II.23. taulatan laburbiltzen dira, hurrenez hurren.



- Berokuntza eta UBS ekoizpenerako sistema elektrikoak erabiltzen dituzten etxebizitzet osatutako erreferentziatzko eraikina, sistema horien sasoiko batez besteko efizientzia %99 dela suposatuz.
- Berokuntza eta UBS ekoizpenerako gas naturalezko galdara indibidualak erabiltzen dituzten etxebizitzet osatutako erreferentziatzko eraikina, sistema horien sasoiko batez besteko efizientzia %82 dela suposatuz.

Beraz, kostu-maila optimoaren metodologia 34 EEEi aplikatzen zaie. Hauek, eraikin-arketipo guztiek osatutako etxebizitza-multzoaren %76 adierazten dute edo, gauza bera dena, Bilboko bizitegi-parkearen %67.

EE bakoitzaren adierazgarritasuna 8. Taulan adierazten da. Kostu-maila optimoaren metodologiarekin aztertutako etxeak erdia baino gehiago direla etxebizitza adierazgarri guztietan, 11., 14. eta 17.ean izan ezik.

8. Taula: kostu-maila optimoaren metodologia aplikatu zaien EEak.

|               | <b>Etxebizitza kopurua</b> | <b>Gas naturalezko sistema duten EEak</b> | <b>Sistema elektrikoak duten EEak</b> | <b>Analisian sartutako etxebizitzet zatia</b> |
|---------------|----------------------------|---|---------------------------------------|---|
| <b>1. EA</b>  | 9.124                      | %36,0                                     | %59,2                                 | %95,2   |
| <b>2. EA</b>  | 9.926                      | %47,3                                     | %47,4                                 | %94,7   |
| <b>3. EA</b>  | 5.802                      | %39,7                                     | %53,0                                 | %92,7   |
| <b>4. EA</b>  | 13.060                     | %52,8                                     | %38,5                                 | %91,4   |
| <b>5. EA</b>  | 5.336                      | %55,2                                     | %24,9                                 | %80,2   |
| <b>6. EA</b>  | 3.749                      | %43,4                                     | %11,4                                 | %54,8   |
| <b>7. EA</b>  | 7.474                      | %41,3                                     | %55,8                                 | %97,1   |
| <b>8. EA</b>  | 8.663                      | %46,3                                     | %40,6                                 | %86,9   |
| <b>9. EA</b>  | 7.947                      | %51,7                                     | %38,5                                 | %90,2   |
| <b>10. EA</b> | 20.154                     | %36,1                                     | %33,8                                 | %69,8   |
| <b>11. EA</b> | 4.397                      | %8,4                                      | %14,5                                 | %22,9   |
| <b>12. EA</b> | 4.516                      | %20,5                                     | %68,3                                 | %88,9   |
| <b>13. EA</b> | 14.238                     | %33,5                                     | %19,8                                 | %53,3   |
| <b>14. EA</b> | 5.592                      | %13,4                                     | %11,4                                 | %24,8   |
| <b>15. EA</b> | 6.223                      | %64,8                                     | %20,8                                 | %85,6   |
| <b>16. EA</b> | 7.691                      | %55,5                                     | %18,4                                 | %73,9   |
| <b>17. EA</b> | 3.134                      | %21,9                                     | %10,2                                 | %32,1   |

### 3.2.2.1.4 Oinarritzko UBS eskaria

3.2.1.3.2. atalean, eraikin-arketipoen ereduak balioztatze erabilitako kontsumo-datu errealak biltzeko burututako inkesta deskribatzen da. Inkesta horrek, urteko berokuntza energia-kontsumoari buruzko informazioa emateaz gain, Bilboko biztanleen batez besteko UBS kontsumoa ere zenbatesten du.

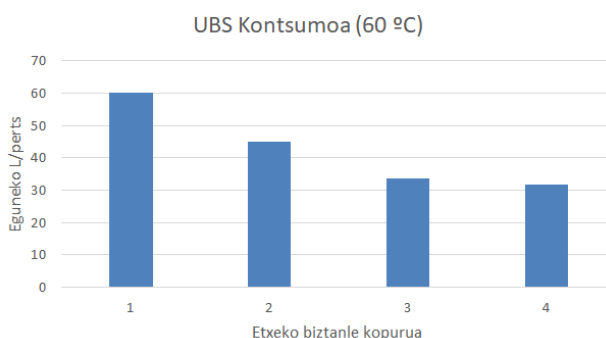
Emaitzek egunean 59 litrotik 69ra bitarteko batez besteko kontsumoa erakusten dute, aplikatutako ikuspegiaren arabera. Estimazio horietan 45°C-ko entrega-temperatura hartzen da kontuan UBSrentzako. Bestalde, CTE arauak emandako erreferentziatzko UBS kontsumoa,

egunean pertsonako 28 litro dena, 60°C-ko entrega-temperaturan definitzen da. Beraz, Bilbori dagozkion hileko batez besteko temperaturak erabiltzen dira inkestaren emaitzak 60°C-ko entrega-temperaturara egokitzeko. Temperatura horretan, egunean 37-43 litroren *per capita* erabilera lortzen da; hau da, CTEk emandako kontsumoa baino %32 eta %53 gehiago.

Beraz, bidezkoa dirudi galdetzea egungo estandar nazionala zaharkituta dagoen edota UBS kontsumo erreala behar bezala adierazten duen. Zentzu horretan, burututako inkestaren emaitzak etxebizitzaren UBS erabilerari buruzko informazioa biltzen duten beste azterketa magnitude-ordenaren barruan daude. Adibidez, [68]-k eguneko 45 litroko *per capita* kontsumoa ematen du Kanadarentzako, 52°C-tan adierazita. Australian, [69]-en kalkuluen arabera eguneko 62 litro kontsumitzen dituzte biztanleek, 40 °C-tan. Erresuma Batuko etxeek, berriz, egunean 122 litro UBS erabiltzen dituzte batez beste, 52 °C-tan [70]. Familien batez besteko tamaina 2,5 pertsonakoa izanik, biztanle bakoitzeko 49 litro lortzen dira.

Bestalde, dutxetan erabilitako UBS emariari dagokienez, 40°C-tan dagoen 0,13 – 0,14 l/s inguruko emari balioa tipikotzat har daiteke, [71]-k egindako azterketaren arabera. Horrek esan nahi du 5 minutuko dutxa bakar batean jada 42 litro UBS erabiliko lireratekeela, eta honi UBS kontsumitzen duten gainerako erabilerak gehitu behar zaizkio, hala nola sukaltarriarena, konketarena eta abar. Beraz, inkestatik lortutako UBS batez besteko kontsumoaren emaitzak espero diren balioen artean daudela ondoriozta daiteke.

Halaber, inkestaren emaitzek joera interesgarri bat erakusten dute: etxeko biztanle kopurua zenbat eta handiagoa izan, orduan eta txikiagoa da UBS *per capita* kontsumoa (15. Irudia). Hau eskala-ekonomia efektu baten ondorio da, sukaltarriarenaren moduko kontsumoak biztanle gehiagoren artean banatzen direlako. Ondorioz, biztanle gutxiagoko etxebizitzek estandar nazionalak adierazten dutena baino UBS gehiago kontsumitzen dute pertsonako, beste ikerketa batzuetan gertatzen den bezala [72]. Aldiz, biztanle kopurua handitu ahala, UBSren batez besteko kontsumoa asko hurbiltzen da estandarren baliora.



**15. Irudia: etxeko biztanle kopuruaren arabera eguneko UBS per capita kontsumoa.**

Birgaitze energetikoen ebaluazioan, lor daitekeen energia-aurrezkoa gain-zenbatestea saihesteko, egunean 40 litroko UBS kontsumoa kontsideratzen da pertsonako, 60°C-ko temperaturan. Eraikin-arketipo bakoitzean egunean kontsumitzen den UBS balioesteko, arketipo bakoitzaren etxebizitza-kopurua eta hauen batez besteko okupazioa hartzen dira kontutan.

### 3.2.2.1.5 Eraginkortasun energetikoko neurriak

Aztertutako EENak 9. Taulan laburbiltzen dira.

9. Taula: aztertutako EENen deskribapen orokorra.

| EEN                                 | Deskribapena   | Izena               | Ezaugarri tekniko nagusiak   | Inbertsio-kostua               |
|-------------------------------------|--|---------------------|--|--------------------------------|
| Fatxadaren isolamendu termikoa      | Fatxadaren isolamendu-mailaren hobekuntza, kanpotik, morteroz finkatutako artile mineralako panelekin eta kanpoko mortero apaingarri iragazgaitzarekin. Beharrezko aldamiaioa barne.   | IL <sub>i</sub> - E | Artile minerala ( $\lambda = 0,038\text{W/mK}$ )   | 59 – 78 €/m <sup>2</sup>       |
|                                     | Fatxadaren isolamendu-mailaren hobekuntza, barrutik, artile mineralarekin eta igeltsuzko panelen zuzeneko estaldurarekin. Azken pintura barne.   | IL <sub>i</sub> - I | Artile minerala ( $\lambda = 0,038\text{W/mK}$ )   | 30 – 56 €/m <sup>2</sup>       |
| Teilatuaren isolamendu termikoa     | Zeramikazko teilak desmuntatzea, artile mineralako panelak zuzeko listoen artean instalatzea eta geruza iragazgaitza eta zeramikazko estalki berria jartzea. Isolamendu-panelen lodiera fatxadaren isolamenduarekin parekatu da.             | R <sub>li</sub>     | Artile minerala ( $\lambda = 0,038\text{W/mK}$ )   | 83 – 98 €/m <sup>2</sup>       |
| Barneko pareten isolamendu termikoa | Berokuntzarik gabeko eremuekin kontaktuan dauden hormei 1 cm-ko isolamendua gehitzea.  | PI                  | EPS ( $\lambda = 0,038\text{W/mK}$ )   | 30 €/m <sup>2</sup>            |
| Leihoen ordezkapena                 | Beira bikoitzeko 4/6/4 leihoak jartzea, PVCzko markoarekin.  | W1                  | $U_{\text{beira}} = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; $g = 0,76$  | 267 €/m <sup>2</sup>           |
|                                     | Emisibitate txikiko eta beira bikoitzeko 6/16/4 leihoak jartzea, PVCzko markoarekin.   | W2                  | $U_{\text{beira}} = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; $g = 0,63$  | 307 €/m <sup>2</sup>           |
| Berokuntza-sistemaren hobekuntza    | Kondentsaziozko galdara berria instalatzea.  | CB                  | 25 kW<br>Sasoiko efizientzia = %86 (GBA)   | 2.000 €                        |
|                                     | GN hornitzeko linea berri bat, kontagailua, etxebizitzaren GN instalazioa, termostatoa, ur beroa banatzeko hodiak eta erradiadoreak instalatzea.   |                     | -  | 41 – 52 €/m <sup>2</sup>       |
| Eguzki-kolektore termikoak          | UBS ekoizteko kolektore lauen instalazioa, euskarri-egiturak, konexio hidraulikoak, bero-trukagailua, ponpak, UBS biltegitratze-depositua eta etxebizitza bakoitzera UBS banatzeko hodiak barne. UBS eskariaren %30 asetzeko dimentsionatua. | DHW 30%             | Kolektorearen azalera = 2,3 m <sup>2</sup><br>$F_R(\tau\alpha)_n = 0,76$<br>$F_R U_L = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$                        | 1.046 – 1.419 €/m <sup>2</sup> |
|                                     | UBS ekoizteko kolektore lauen instalazioa, euskarri-egiturak, konexio hidraulikoak, bero-trukagailua, ponpak, UBS biltegitratze-depositua eta etxebizitza bakoitzera UBS banatzeko hodiak barne. UBS eskariaren %60 asetzeko dimentsionatua. | DHW 60%             |  | 688 – 844 €/m <sup>2</sup>     |
| Energia fotovoltaikoa               | Teilatuan sistema fotovoltaiko baten instalazioa, multi-c-Si panelez osatua, haren euskarri-egitura eta inbertsorearekin. Muntaketa-ziurtagiriak eta instalazioa legeztatze beharrezko txosten teknikoak barne.                              | PV                  | 330 W <sub>p</sub> panelak (1,95 m <sup>2</sup> )<br>Panelen ef. nominala = %17<br>Inbertsorearen ef. = %97<br>Degradazioa = %0,8/urte | 205 – 220 €/m <sup>2</sup>     |

Kanpoko isolamendu termikoaren lau maila eta barneko isolamendu termikoaren hiru maila ezberdin aztertu dira, aurreko CTEaren [20] eta EnerPHit-en [73] mailen artean. Kasu bakoitzean, isolamendu-maila bera aplikatu zaio fatxada eta teilatuari, ingurutzaileren isolamendu koherente bat bermatuz. 10. Taulak EE bakoitzari aplikaturiko isolamendu-lodierak adierazten ditu, jatorrizko fatxada-motaren arabera desberdinak direnak. 1981aren osteko eraikinak jadanik zertxobait isolatuta daudenez, horietan kanpoko hiru isolamendu-maila baino ez dira ebaluatu. Bere jarraitutasuna dela eta, kanpo-isolamenduak nabarmen murriztu dezake zenbait zubi termikoren eragina: analisisian kontuan hartu diren transmitantzia linealeko birgaitu osteko balioak CTEko katalogotik lortu dira [74].



10. Taula: EE bakoitzari aplikaturiko isolamendu lodiera-mailak eta birgaitutako fatxadaren U-balioak.

|                   |   | EE                                      | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           | 6           | 7           | 8           | 9           | 10          | 11          | 12          | 13          | 14          | 15          | 16          | 17          |      |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|-------------------|---|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|--|------|--|--|--|------|--|--|--|--|
|                   |   | <b>Fatxadaren U (W/m<sup>2</sup>K)</b>  | <b>1,77</b> | <b>1,77</b> | <b>2,09</b> | <b>1,77</b> | <b>1,77</b> | <b>1,77</b> | <b>1,26</b> | <b>1,26</b> | <b>1,26</b> | <b>1,38</b> | <b>1,26</b> | <b>1,38</b> | <b>1,38</b> | <b>1,38</b> | <b>0,63</b> | <b>0,93</b> | <b>0,75</b> |      |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
| Kanpo-isolamendua | IL1 - E                                 | Gehitutako isol. lodiera (cm)           | 3           | 3           | 3           | 3           | 3           | 3           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           | 3           | 2           |      |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|                   |   | Birg. fatxadaren U (W/m <sup>2</sup> K) | 0,74        | 0,74        | 0,78        | 0,74        | 0,74        | 0,74        | 0,76        | 0,76        | 0,76        | 0,8         | 0,76        | 0,8         | 0,8         | 0,8         | 0,47        | 0,54        | 0,54        |      |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|                   | IL2 - E                                 | Gehitutako isol. lodiera (cm)           | 5           | 5           | 6           | 5           | 5           | 5           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 6           | 5    |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|                   |   | Birg. fatxadaren U (W/m <sup>2</sup> K) | 0,47        | 0,47        | 0,48        | 0,47        | 0,47        | 0,47        | 0,54        | 0,54        | 0,54        | 0,56        | 0,54        | 0,56        | 0,56        | 0,56        | 0,56        | 0,38        | 0,38        | 0,38 |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|                   | IL3 - E                                 | Gehitutako isol. lodiera (cm)           | 7           | 7           | 8           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 7           | 9           | 8    |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|                   |   | Birg. fatxadaren U (W/m <sup>2</sup> K) | 0,37        | 0,37        | 0,38        | 0,37        | 0,37        | 0,37        | 0,38        | 0,38        | 0,38        | 0,39        | 0,38        | 0,39        | 0,39        | 0,39        | 0,39        | 0,29        | 0,29        | 0,29 |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|                   | IL4 - E                                 | Gehitutako isol. lodiera (cm)           | 11          | 11          | 11          | 11          | 11          | 11          | 10          | 10          | 10          | 10          | 10          | 10          | 10          | 10          | 10          |             |             |      |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|                   |   | Birg. fatxadaren U (W/m <sup>2</sup> K) | 0,29        | 0,29        | 0,29        | 0,29        | 0,29        | 0,29        | 0,29        | 0,29        | 0,29        | 0,3         | 0,29        | 0,3         | 0,3         | 0,3         |             |             |             |      |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
| Barne-isolamendua | IL1 - I                                 | Gehitutako isol. lodiera (cm)           | 3           | 3           | 3           | 3           | 3           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           |             |             |             |             |      |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|                   |   | Birg. fatxadaren U (W/m <sup>2</sup> K) | 0,74        | 0,74        | 0,78        | 0,74        | 0,74        | 0,74        | 0,76        | 0,76        | 0,76        | 0,8         | 0,76        | 0,8         | 0,8         |             |             |             |             |      |  | 0,8  |  |  |  |      |  |  |  |  |
| IL2 - I           | Gehitutako isol. lodiera (cm)           | 4                                       | 4           | 4           | 4           | 4           | 4           | 3           | 3           | 3           | 3           | 3           | 3           | 3           |             |             |             |             |             |      |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|                   | Birg. fatxadaren U (W/m <sup>2</sup> K) | 0,62                                    | 0,62        | 0,65        | 0,62        | 0,62        | 0,62        | 0,63        | 0,63        | 0,63        | 0,66        | 0,63        | 0,66        | 0,66        |             |             |             |             |             |      |  | 0,66 |  |  |  |      |  |  |  |  |
| IL3 - I           | Gehitutako isol. lodiera (cm)           | 6                                       | 6           | 6           | 6           | 6           | 6           | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           | 5           |             |             |             |             |             |      |  |      |  |  |  |      |  |  |  |  |
|                   | Birg. fatxadaren U (W/m <sup>2</sup> K) | 0,47                                    | 0,47        | 0,48        | 0,47        | 0,47        | 0,47        | 0,47        | 0,47        | 0,47        | 0,49        | 0,47        | 0,49        | 0,49        |             |             |             |             |             |      |  |      |  |  |  | 0,49 |  |  |  |  |

Halaber, leihoak ordezkatzarekin lotutako hermetikotasun hobekuntza ere kontsideratu da. Beraz, airearen infiltrazio-tasa txikiagotu da leihoen ordezkapena ematen denean. Kontuan izanik hermetikotasun handiko leihoen jarduera ere murriztu daitekeela hauek instalatzerakoan izandako akatsen ondorioz (adibidez, markoaren muntaia desegokia), eta lor daitekeen energia-aurrezkiaren estimazioan alde seguruan egoteko, analisi honetan infiltrazio-tasa %25 murrizten dela kontsideratu da. Hau Iberiar Penintsulan egindako zenbait ikerketen emaitzen beheko tartean kokatzen da [75] [76] [77] [78].

Neurri-paketeak osatzeko, lehenengo EEN pasiboen konbinazioak aztertu dira, hauekin lortutako berokuntza-eskari hobetuak Design Builder softwarearen bidez kalkulatzeko. 11. Taulak fatxadako IL<sub>i</sub>-x isolamendu-maila bakoitzarekin simulatutako neurrien konbinazioak laburbiltzen ditu.

11. Taula: IL<sub>i</sub>-x isolamendu-maila bakoitzarekin simulatutako EEN pasiboen konbinazioak.

| Konbinazioa | Fatxadaren isolamendua | Leihoen ordezkapena | Teilatuaren isolamendua | Barneko paretan isolamendua |
|-------------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1           |                        | W1                  |                         |                             |
| 2           |                        | W2                  |                         |                             |
| 3           | IL <sub>i</sub> - x    |                     |                         |                             |
| 4           | IL <sub>i</sub> - x    | W1                  |                         |                             |
| 5           | IL <sub>i</sub> - x    | W2                  |                         |                             |
| 6           | IL <sub>i</sub> - x    |                     | RI <sub>i</sub>         |                             |
| 7           | IL <sub>i</sub> - x    | W1                  | RI <sub>i</sub>         |                             |
| 8           | IL <sub>i</sub> - x    | W2                  | RI <sub>i</sub>         |                             |
| 9           | IL <sub>i</sub> - x    | W1                  | RI <sub>i</sub>         | PI                          |
| 10          | IL <sub>i</sub> - x    | W2                  | RI <sub>i</sub>         | PI                          |

Ondoren, berokuntza-eskariaren emaitzak sistema termikoen eta energia berriztagarrien esku-hartzeekin konbinatu dira, 12. Taularen arabera. Guztira, 464 neurri-pakete aplikatu zaizkio EE bakoitzari.

**12. Taula: simulatutako neurri pasibo eta sistemen konbinazioak.**

| Esku-hartzeen konbinazioa |                              |
|---------------------------|------------------------------|
| 1                         | Neurri pasiboak bakarrik (P) |
| 2                         | P + CB                       |
| 3                         | P + DHW 30%                  |
| 4                         | P + DHW 60%                  |
| 5                         | P + PV                       |
| 6                         | P + CB + DHW 30%             |
| 7                         | P + CB + DHW 60%             |
| 8                         | P + CB + PV                  |

UBS ekoizteko eguzki-sistemaren dimentsionamendua lortu nahieko eguzki-ekarpen faktorearen arabera egin da; hots, eguzki-energiarekin asetutako urteko UBS-eskariaren zatia. CTE araudiaren azken eguneratzeak %30etik %60ra igo du Bilboko zonalde klimatikoan etxe berrietan aplikatu beharreko gutxieneko eguzki-ekarpena. Horrela, analisi honek bi eguzki-ekarpen faktoreak aztertu ditu.

Sistemaren dimentsionamendua F-Chart metodo erdi-enpirikoa [79] erabiliz burutu da. Honekin, eguzki-ekarpen faktore bakoitzera hurbiltzeko beharrezkoak diren kolektore kopurua eta biltegitratze-deposituaren edukiera estimatu dira, kolektoreen orientazioa eraikinaren berdina dela jotz. Dimentsionamendu honekin, SAM softwarearen Solar Water Heat modulua [80] erabili da urteko ekoizpen kalkulua ordu-tarteetan egiteko. Modulu horrek begizta itxiko plaka lau kolektore bat modelatzen du, laneko fluidotik UBS biltegitratze-depositura energia bero-trukagailu baten bidez transferitzen duena.

Sistema fotovoltaikoari dagokionez, CTEk elektrizitate berriztagarria sortzeko gutxieneko potentzia bat ezartzen du eraikin batzuentzako, beren guztizko azaleraren arabera. Halaber, instalatu beharreko gutxieneko potentzia horrentzat goi-muga bat ere ezartzen du, eraikinaren teilatuaren azaleraren arabera. Lan honek kalkulu-metodo horiek erabili ditu sistema fotovoltaikoak dimentsionatzeko irizpide gisa, SAM softwarearen Detailed Photovoltaic Model ereduarekin [81] simulatu direnak. Moduluetakako efizientziak eguzki-energia elektrizitate bihurtzeko CEC Performance Model ereduaren bidez kalkulatu dira. 13. Taulak EE bakoitzean kontsideratutako modulu kopurua eta inbertsio-potentzia adierazten ditu, eta baita simulazioen emaitzak ere jarduera-ratio (Performance Ratio, PR) moduan. Definitutako DC/AC erlazioa 1,15ekoa izan da.

Bai eguzki-kolektore termikoetarako, eta baita modulu fotovoltaikoetarako ere, eraikinaren teilatuaren espazio erabilgarria bere azalera osoaren %50 dela kontsideratu da, murrizketa hori kasu guztietan bermatzen dela egiaztatuz.

Bestalde, EEN ezberdinen inbertsio-kostuak, 9. Taulan adierazten direnak, merkatuko prezioetan oinarritu dira. Horretarako, CYPE datu-basea [82] eta Eusko Jaurlaritzaren eraikuntzaren eta urbanizazioaren prezioen datu-basea [83] erabili dira, kostu materialak eta lan-kostuak barneratzen dituztenak. Horien gainean, %5eko kostu orokorrak eta %8ko marjina aplikatu dira. Gainera, ikuspegi mikroekonomikoan %10eko BEZ eta %2,5eko obren gaineko zerga kontsideratu dira, azken hau %60ko hobariarekin eguzki sistemetarako.

13. Taula: simulatutako eguzki-kolektore termikoen eta sistema fotovoltaikoen dimentsionamendua.

|       | Eguneko UBS kontsumoa (l) | DHW %30 sistema   |               |                         | DHW %60 sistema   |               |                         | PV sistema     |                  |                           | PR   |
|-------|---------------------------|-------------------|---------------|-------------------------|-------------------|---------------|-------------------------|----------------|------------------|---------------------------|------|
|       |                           | Kolektore kopurua | Depositua (l) | Eguzki-ekarpen faktorea | Kolektore kopurua | Depositua (l) | Eguzki-ekarpen faktorea | Modulu kopurua | Inbertsorea (kW) | Urteko ekoizpena (kWh/kW) |      |
| EE 1  | 640                       | 3                 | 1.000         | 0,36                    | 7                 | 1.000         | 0,62                    | 14             | 1 x 4,2 kW       | 1.105                     | 0,78 |
| EE 2  | 640                       | 3                 | 1.000         | 0,36                    | 7                 | 1.000         | 0,62                    | 18             | 1 x 5,2 kW       | 1.105                     | 0,78 |
| EE 3  | 1.120                     | 5                 | 1.500         | 0,31                    | 14                | 1.700         | 0,58                    | 24             | 1 x 6,5 kW       | 985                       | 0,79 |
| EE 4  | 1.120                     | 5                 | 1.500         | 0,31                    | 14                | 1.700         | 0,58                    | 27             | 1 x 7,9 kW       | 985                       | 0,79 |
| EE 5  | 1.680                     | 8                 | 2.000         | 0,33                    | 22                | 2.600         | 0,60                    | 36             | 2 x 5,3 kW       | 983                       | 0,78 |
| EE 6  | 1.680                     | 8                 | 2.000         | 0,33                    | 22                | 2.600         | 0,60                    | 40             | 2 x 6 kW         | 982                       | 0,78 |
| EE 7  | 960                       | 4                 | 1.200         | 0,33                    | 10                | 1.200         | 0,60                    | 22             | 1 x 6,3 kW       | 1.105                     | 0,78 |
| EE 8  | 960                       | 4                 | 1.200         | 0,33                    | 10                | 1.200         | 0,60                    | 27             | 1 x 7,8 kW       | 1.096                     | 0,77 |
| EE 9  | 1.440                     | 6                 | 1.600         | 0,33                    | 15                | 1.800         | 0,60                    | 32             | 2 x 4,6 kW       | 1.092                     | 0,77 |
| EE 10 | 1.440                     | 6                 | 1.600         | 0,33                    | 15                | 1.800         | 0,60                    | 40             | 2 x 5,6 kW       | 1.092                     | 0,77 |
| EE 11 | 1.440                     | 6                 | 1.800         | 0,30                    | 18                | 2.100         | 0,58                    | 54             | 2 x 7,7 kW       | 981                       | 0,78 |
| EE 12 | 2.880                     | 11                | 3.000         | 0,32                    | 30                | 3.500         | 0,61                    | 32             | 2 x 4,6 kW       | 1.092                     | 0,77 |
| EE 13 | 2.880                     | 11                | 3.000         | 0,32                    | 30                | 3.500         | 0,61                    | 39             | 2 x 5,6 kW       | 1.090                     | 0,77 |
| EE 14 | 4.320                     | 16                | 4.500         | 0,32                    | 42                | 5.000         | 0,62                    | 54             | 2 x 7,7 kW       | 1.166                     | 0,79 |
| EE 15 | 1.440                     | 6                 | 1.600         | 0,34                    | 15                | 1.800         | 0,61                    | 27             | 1 x 7,8 kW       | 1.096                     | 0,77 |
| EE 16 | 2.160                     | 9                 | 2.400         | 0,34                    | 23                | 2.700         | 0,62                    | 40             | 2 x 5,7 kW       | 1.092                     | 0,77 |
| EE 17 | 4.680                     | 18                | 5.000         | 0,32                    | 42                | 5.200         | 0,57                    | 40             | 2 x 5,6 kW       | 1.092                     | 0,77 |

Halaber, lan honetan kontsideratutako urteko kostuak mantentze-, ordezkate- eta energia-kostuak dira. Ikuspegi makroekonomikotik egindako kalkuletan karbonoaren kostua ere sartu da. Mantentze-kostua inbertsio-kostuaren ehuneko gisa ezarri da, 14. Taulan adierazten den moduan. Ez da kondentsazio-galdara berrirako mantentze-kosturik kontuan hartu, suposatu baita egungo sistemaren kostuaren antzekoa izango litzatekeela.

14. Taula: EEN ezberdinentzako kontsideratutako bizi-tza-erabilgarria eta urteko mantentze-kostua

|                                   | Bizi-tza-erabilgarria | Urteko mantentze-kostua |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Inguratzailerearen osagai opakak  | 50                    | %0,0                    |
| Leihoak                           | 30                    | %0,0                    |
| Kondentsazio galdara              | 20                    | %0,0                    |
| Kobrezko hoditeria, erradiadoreak | 30                    | %0,0                    |
| Eguzki-sistema termikoa           | 25                    | %0,5                    |
| Sistema fotovoltaikoa             | 25                    | %0,5                    |

Esku-hartze bakoitzerako kontuan izandako bizi-tza-erabilgarria ere 14. Taulan adierazten da. 28 urteko kalkulu-aldia baino bizi-tza-erabilgarri laburragoa duten elementuetarako, suposatu da etorkizuneko ordezkapen-kostua inbertsio-kostuaren berdina litzatekeela, termino errealetan. Bestalde, kalkulu-aldia baino bizi-tza-erabilgarri luzeagoa duten osagaiantzat, hondar-balioak inbertsioaren (edo ordezkapen-kostuaren) balio-galera lineala kontsideratuz ezarri dira, kalkulu-aldiko hasierako unera deskontatuta. Ez dira ezabatze-kostuak kontuan izan.

### 3.2.3 Hirugarren fasea: aukera diskretuko ereduaren estimazioa

Ikerketaren azken fasearen helburua, etxejabeek beren etxebizitzak termikoki isolatzeko duten alde-aurretiko jarrera aztertzea izan da, eta baita erabaki hori hartzeko prozesuan eragiten duten faktoreak ere. Halaber, finantza-pizgarri ezberdinek erabaki hori baldintzatu dezaketen neurria ere aztertu da, etxebizitzaren ezaugarrien arabera.

Horretarako, aukera diskretuko eredu bat garatu da, DCE baten bidez bildutako lagin-datuetatik batean oinarritzen dena. Eredu horrek etxejabeek etxea termikoki isolatzera bultzatzen dieten faktoreak neurtzen ditu, etxebizitzaren ezaugarrien eta finantza-pizgarri ezberdinen arabera espero daitezkeen birgaitze-tasak kuantitatiboki zenbatetsiz.

Espezifikoki, analisi hau:

- Fatxaden isolamendu termikoan zentratu da, etxebizitzaren berokuntza-kontsumoan eragin gehien izan dezakeen eraginkortasun energetikoko neurria delako.
- Apartamentu-blokeen analisisira mugatu da, hauek baitira batik bat Bilboko (eta Euskadiko) bizitegi-parkea osatzen dutenak.

Halaber, azterketa honen helburua ez da isolamendu termikoko teknologia lehiakideen artean etxejabeek dituzten lehentasunak aztertzea, baizik eta energia-eraginkortasuneko neurri honetan inbertitzea ala ez erabakiaren dikotomia aztertzea. Horrela, erabaki horretan eragin dezaketen faktoretan sakontzen du.

#### 3.2.3.1 Aukera Diskretuko Esperimentuaren diseinua

Eraginkortasun energetikoko neurriarekiko etxejabeek duten jarrera aztertzeko, azken hauetariko lagin bati zenbait aukera-multzo aurkeztu zaizkio, kasu bakoitzean gehien gustatzen zaien aukera hautatzeko eskatuz.

Bizitza errealeko hautaketa-egoerak islatzeko, bere eraikinaren jabeekideen batzarra eraikin komunitarioaren fatxada termikoki isolatu ala ez eztabaidatzen ari dela imajinatzen eskatu zaie inkestatuei. Batzarra bitan banatuta dago eta, beraz, azken erabakia inkestatuaren botoaren mende dago. Kontextu honetan, inkestatuei fatxada isolatzeko bi aukera ezberdin edo egungo egoera mantentzeko (birgaitzerik ez egiteko) aukera eskaini zaizkie, hiru aukera horien artean gehien gustatzen zaiena hautatzeko eskatuz.

Bi birgaitze alternatibak ezaugarri edo atributuen batzuen bidez deskribatu dira, etxea termikoki isolatzea aukeratzekoan etxejabeentzako garrantzitsutzat jo direnak. Hasiera batean, atributu horien behin-behineko multzo bat definitu da, literaturaren berrikuspen sakon batean eta esperientzian oinarrituta. Ondoren, *focus group* eztabaida-saio bat garatu da, egoera sozioekonomiko ezberdineko 12 etxejabeekin, behin-behineko atributu multzoarekiko iritziak jasotzeko helburuarekin. Saioan zehar, DCEan sartu beharreko atributuak identifikatzeaz gain, parte-hartzaileek emandako garrantziaren arabera, atributu bakoitzaren mailak ere zehaztu dira.

Horrela, birgaitze alternatibak bost atributuen bidez karakterizatu dira: inbertsio-kostua, urteko energia-aurrezkoa, zuzeneko diru-laguntza publikoa, finantziazioaren interes-tasa eta kerkari fiskala. Finantza-pizgarri ezberdinen eragina aztertzearren helburuarekin bat, azken hiru

atributuak gobernuak ezar ditzakeen aldagaiak. Analisisan erabilitako atributu bakoitzaren mailak 15. Taulan adierazten dira.

15. Taula: DCEan erabilitako atributuak eta atributu-mailak.

| Atributuak                      | Atributu-mailak |
|---------------------------------|-----------------|
| Inbertsio-kostua (k€-tan)       | 6, 12           |
| Urteko energia-aurrezkia        | %30, %45        |
| Zuzeneko diru-laguntza publikoa | %0, %20, %35    |
| Finantziazioaren interes-tasa   | %2, %5          |
| Kenkari fiskala                 | %18, %25        |

Ezarritako atributu-mailek fidelki islatzen dute bizitza erreala. Inbertsio-kostuaren eta urteko energia-aurrezkiak bigarren fasean burututako azterketan oinarritzen dira. Diru-laguntza publikoaren mailak Espainian egon diren laguntza-programekin koherentea da [84] [85] [86]. Finantziazioaren interes-tasaren mailak definitzeko, maileguren merkatua aztertu da [87] [88] [89] [90]. Gaur egun, %5eko batz besteko interes-tasa egiaztatu da eta, horrekin alderatuta, %2ko tasa murriztua definitu da balizko finantziazio bigun alternatibotzat. Era berean, egungo arau fiskalak aukera ematen du horrelako birgaitze energetikoetan inbertsio-kostuen %18 deduzitzeko [91]. Halaber, %25eko kenkari fiskal handiago bat definitu da, etxeek laguntza-mekanismo honekiko duten sentikortasuna ebaluatzeko.

Bestalde, hautaketaren konplexutasunarekin lotutako limiteek esperimentuan sartu daitekeen atributu-kopurua mugatzen dute, inkestatuari karga kognitiboa arintzeko. Hasiera batean urteko CO<sub>2</sub>-aurrezkia atribututzat definitzea kontsideratu den arren, ingurumen-ikuspegia barneratzeko, eztabaida-saioan zehar alde batera utzi da, urteko energia-aurrezkiarekin estu lotuta dagoela ulertuz. Amortizazio-aldia ere esperimentuaren diseinutik kanpo utzi da, inbertsio-kostuarekin eta ondoriozko energia-aurrezkiarekin lotuta dagoela kontsidera baitaiteke. Gainera, horrela, bizitza errealean maiz ematen den itzulera ekonomikoaren inguruko ziurgabetasuna adierazten da ere.

15. Taulako atributuen eta mailen konbinazioak 48 birgaitze alternatiba posible sortuko lituzke. Alternatiba hauek bikoteka parekatuz gero, 1128 multzo posible existituko liriateke. Beraz, zenbatetsi beharreko parametroen fidagarritasuna maximizatzen duen multzo espezifikoak identifikatzeko, kobariantza-matrize asintotikoaren elementuak minimizatuz, diseinu D-efiziente bat sortu da [47]. Azken hau zenbatetsi ahal izateko, ordea, estimatu nahi den aukera diskretuko ereduaren parametroei buruzko aurretiko informazioa behar da.

Hala, atariko urrats gisa, analisi pilotu bat burutu da, sei aukera-multzoko galdera-sorta bat eratuz. Horrekin, 8 elkarrizketa kognitibo egin dira adin desberdinetako pertsonekin, galdeketa- ulergarritasuna eta informazio-maila egiaztatzeko. Jasotako feedback-ean oinarrituta, galderen argitasuna hobetu da, idazketa- eta diseinu-alderdi batzuk finduz. Inkesta osatzeko beharrezko denboraren egokitasuna ere egiaztatu da, eta baita proposatutako atributuen mailak ere, aukera-multzoetan alternatiba dominanterik ez dagoela egiaztatzeko. Analisi pilotua bi astetan zehar egin da, 62 inkestatuen erantzunak bilduz. Informazio horrekin,

definitutako bost atributuek eta isolamendu termikoaren alternatiben konstante espezifikoak osatutako ereduaren parametroak estimatu dira.

Atariko parametro horiek DCE diseinu D-efiziente bat sortzeko erabili dira, R softwarea erabiliz [35]. Inkestatuen lan-efortzua murrizteko, esperimendu hau 6 aukera-multzora mugatu da. Diseinu-murrizketa bat ere ezarri da, aukera-multzo bakoitzean bi birgaitze alternatibek inbertsio-kostu bera izan dezaten, hautatze-lanaren balizko izaera murriztuz. Fedorov truke-algoritmo aldatua aplikatu da, hasierako diseinu-matrize baten alternatibak trukatzeko dituen kobariantza-matrize asintotikoaren determinatzailearen D-errorea minimizatzeko. Hala ere, onartzen da geroago eredia estimatzean baliagarritasun-funtzioari aldagai sozioekonomikoak gehitzeak diseinu esperimentalaren efizientzia murriztu dezakeela.

### 3.2.3.2 Bildutako lagina

Burututako esperimentuaren xede-populazioa, Bizkaiko apartamentu-blokeetan bizi diren etxejabeak izan dira. Beraz, familia bakarreko etxeak alde batera utzi dira. Gainera, birgaitze energetikoak egiteko erabakietan benetan parte hartzen duten norbanakoei bideratu da inkesta (hots, etxejabeek), alokatutako etxebizitzetan bizi diren maizterrak azterketatik kanpo geratuz. Galdeketa hasieran, baldintza horiek betetzen dituzten pertsonak filtratu dira.

Datuak 2022ko urtarrilaren erdialdetik 2022ko otsailaren bukaerara arte jaso dira, probintziako hainbat etxetara galdeketa online egiteko esteka bidaliz. Galdeketa lau ataletan banatu da: 1) sarrera, 2) fatxaden isolamendu termikoari buruzko informazioa, 3) esperimendua bera eta 4) inkestatuaren datu sozioekonomikoak. Sarreran, esperimendua zertan datzan azaldu da, bere helburua eta behar bezala egiteko jarraibideak deskribatuz. Bigarren atalean, fatxaden isolamendua hobetzeak dakartzen onurei buruzko informazioa eman da, hala nola, konfort-termikoa, airearen kalitatea eta zarataren aurkako babesa hobetzea. Horrez gain, birgaitze lanak egiteak dakartzen eragozpenak ere deskribatu dira. Besteak beste, zarata, hautsa, segurtasunik eza, eta baita ekarriko duen energia-aurrezkiarekin lotutako ziurgabetasuna ere. Hirugarren atalean, inkestatutakoek 6 aukera-multzo erantzun dituzte, horietako bakoitzean emandako hiru alternatiben artean bakarra hautatu behar izan dutelarik. Aukera-multzo bakoitza txartel antzeko bat izan da, fatxada isolatzeko bi alternatiben ezaugarriak erakusten dituen, egungo egoera mantentzeko aukerarekin batera (16. Irudia). Azkenik, banakako ezaugarriei buruz galdetu zaie elkarrizketatuei: sexua, adina, errenta, etxeko tamaina, berokuntza-sistema mota, etab.

Guztira 223 galdeketa jaso diren arren, horietako 32 analitiko kanpo utzi dira, datu sozioekonomikoek buruzko informazioa falta zaielako. Horrela, lan honetan aztertutako datu-multzoa 191 inkestatu eta beren 1.145 behaketek osatzen dute. 16. Taulak laginaren ezaugarri sozioekonomikoen banaketa EUSTATEk emandako Bizkaiko populazioaren banaketarekin alderatzen du. Análisi estatistikoak berresten du lagina nahiko adierazgarria dela sexuari, adinari, etxeko errentari eta abarri dagokienez. Hala ere, aipatu beharra dago 65 urtetik gorako nagusiak gutxiegi aurkezten direla laginean, eta baita errenta txikiagoko etxebizitzak ere (20,000€ baino gutxiagokoak).



Orain baldintza hipotetikoak aldatu egin dira.

Zein aukera hautatuko zenuke?

|                               | Fatxada isolatzeko<br>1. alt.    | Fatxada isolatzeko<br>2. alt.    | Ez nuke birgaitzerik<br>egingo         |
|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| Inbertsio-kostua              | 12.000€                          | 12.000€                          |  |
| Urteko energia-aurrezkia      | %45                              | %30                              |  |
| Diru-laguntza publikoa        | -                                | %20                              | -                                      |
| Finantziazioaren interes-tasa | %5                               | %2                               |  |
| Kenkari fiskala               | %25                              | %18                              |  |
|                               | <input type="checkbox"/> 1. Alt. | <input type="checkbox"/> 2. Alt. | <input type="checkbox"/> Egungo egoera |

16. Irudia: DCEan erabilitako aukera-multzoen txartelen adibidea.

16. Taula: laginaren ezaugarri sozioekonomikoen alderaketa EUSTATEk emandako Bizkaiko populazioaren banaketarekin.

| Ezaugarria                              | Lagina (N = 191) | Bizkaiko populazioa<br>(EUSTAT) |
|---|------------------|---------------------------------|
| <b>Sexua</b>                            |                  |                                 |
| Gizonezkoa                              | %57              | %48                             |
| Emakumezkoa                             | %43              | %52                             |
| <b>Adina</b>                            |                  |                                 |
| 19 - 35                                 | %19              | %18                             |
| 36 - 45                                 | %17              | %16                             |
| 46 - 55                                 | %18              | %19                             |
| 56 - 65                                 | %37              | %18                             |
| 65 baino gehiago                        | %9               | %29                             |
| <b>Etxeko errenta</b>                   |                  |                                 |
| 20.000€ baino gutxiago                  | %5               | %22                             |
| 20.001 – 35.000€                        | %23              | %24                             |
| 35.001 – 50.000€                        | %28              | %23                             |
| 50.001 – 70.000€                        | %26              | %15                             |
| 70.001€ baino gehiago                   | %18              | %16                             |
| <b>Berokuntza-sistema</b>               |                  |                                 |
| Elektrikoa                              | %11              | %23                             |
| Gas naturala                            | %75              | %66                             |
| Beste bat                               | %14              | %11                             |
| <b>Berokuntza kontsigna-tenperatura</b> |                  |                                 |
| <= 19°C                                 | %21              | %23                             |
| 20°C                                    | %37              | %43                             |
| 21°C                                    | %30              | %22                             |
| 22°C                                    | %9               | %10                             |
| > 22°C                                  | %3               | %3                              |

### 3.2.3.3 Ereduaren estimazioa

Lan honetan estimatu den MXL ereduak ausazko koefizienteak ezarri ditu alternatiben ezaugarrietarako. Oro har, koefiziente hauek banaketa normalari jarraitzen dutela kontsideratu da, inbertsio-kostuen koefizientea izan ezik. Azken honi zeinu negatiboko banaketa log-normala esleitu zaio. Lehentasun-heterogeneotasuna kontuan hartzeko, ereduaren *mean shifter* batzuk sartu dira ere, atributuen eta aldagai soziodemografikoen arteko interakzioen bitartez.

Ereduaren zenbatespena R softwarea [35] erabiliz burutu da, probabilitate maximoko estimazioa 2000 pseudo-Monte Carlo erauzketekin eginez. Halaber, MNL ereduaren zehaztasun zehatetsi da MXL eredurako erreferentzia gisa.

Ereduaren parametroak zenbatetsi ondoren,  $k$  atributu batengatik ordaintzeko gogoaren banaketa (*willingness to pay*, WTP) 17. ekuazioaren bidez kalkulatu da.

$$WTP_k = - \frac{\mu_k + \gamma_k \cdot z + \sigma_k \cdot d_k}{-\exp(\mu_c + \gamma_c \cdot z + \sigma_c \cdot d_c)} \quad (17)$$

non  $\mu_k$  eta  $\mu_c$   $k$  atributuaren eta inbertsio-kostuaren batez besteko zenbatetsiak diren, hurrenez hurren,  $\sigma_k$  eta  $\sigma_c$  zenbatetsitako desbideratze estandarrak,  $\gamma_k$  eta  $\gamma_c$   $z$  aldagai soziodemografikoari lotutako interakzio-koefizienteak, eta  $d_k$  eta  $d_c$   $N(0,1)$  banaketaren ausazko erauzketak. WTP balioak ausazko 10.000 erauzketa erabiliz kalkulatu dira,  $z$  aldagaiaren balio ezberdinetarako.



## 4. Emaitzak

### 4.1 Lehenengo fasearen emaitzak

17. Taulak modelatutako eraikin-arketipoen urteko berokuntza-eskariak laburbiltzen ditu. Etxebizitza adierazgarri bakoitzaren azalera eta modelatutako arketipo populazio osoaren gaineko kuota kontuan hartuta, bizitegi-parkearen urteko batez besteko berokuntza-eskaria 43,08 kWh/m<sup>2</sup>-koa da.

17. Taula: modelatutako eraikin-arketipoen urteko berokuntza-eskariak.

| Eraikin-arketipoa      | Etxebizitzen kuota modelatutako parke osoarekiko | Etxebizitzen azalera (m <sup>2</sup> ) | Urteko berokuntza eskaria (kWh/m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|--|--|---|
| 1. Ark.                | %6,66  | 60                                     | 68,08   |
| 2. Ark.                | %7,24  | 75                                     | 67,41   |
| 3. Ark.                | %4,23  | 60                                     | 39,24   |
| 4. Ark.                | %9,53  | 75                                     | 39,95   |
| 5. Ark.                | %3,89  | 105                                    | 36,70   |
| 6. Ark.                | %2,74  | 120                                    | 37,79   |
| 7. Ark.                | %5,45  | 60                                     | 57,16   |
| 8. Ark.                | %6,32  | 75                                     | 57,72   |
| 9. Ark.                | %5,80  | 60                                     | 35,90   |
| 10. Ark.               | %14,71   | 75                                     | 37,39   |
| 11. Ark.               | %3,21  | 105                                    | 32,13   |
| 12. Ark.               | %3,30  | 60                                     | 52,25   |
| 13. Ark.               | %10,39   | 75                                     | 31,81   |
| 14. Ark.               | %4,08  | 105                                    | 54,70   |
| 15. Ark.               | %4,54  | 75                                     | 32,58   |
| 16. Ark.               | %5,61  | 75                                     | 27,96   |
| 17. Ark.               | %2,29  | 75                                     | 26,53   |
| <b>Batezbestekoa =</b> |  |  | <b>43,08</b>                                    |

Ikus daitekeenez, eraikuntza-ezaugarrien bilakaerak berokuntza-eskaria murrizteko joera erakusten du. Adibidez, hiri-forma bera eta antzeko eraikin-dimentsioekin, baina fatxadaren konposizio desberdinarekin, 7. Arketipoaren ( $U = 1,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) eta 15. Arketipoaren ( $U = 0,63 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) urteko berokuntza-eskariak 2. Arketipoarena ( $U = 1,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) baino %15 eta %52 txikiagoak dira, hurrenez hurren.

Emaitza orokorrak eraikuntza-aldiaren arabera aztertuz, lortzen diren batez besteko berokuntza-eskariak 18. Taulan adierazten dira. Desarrollismoaren garaiko bi orriko fatxaden

eta 80ko hamarkadan fatxada-isolatzailen hedapenak berokuntza-eskariaren murrizketan izan zuten eragina ikus daiteke, bigarrenarena izanik esanguratsuagoa.

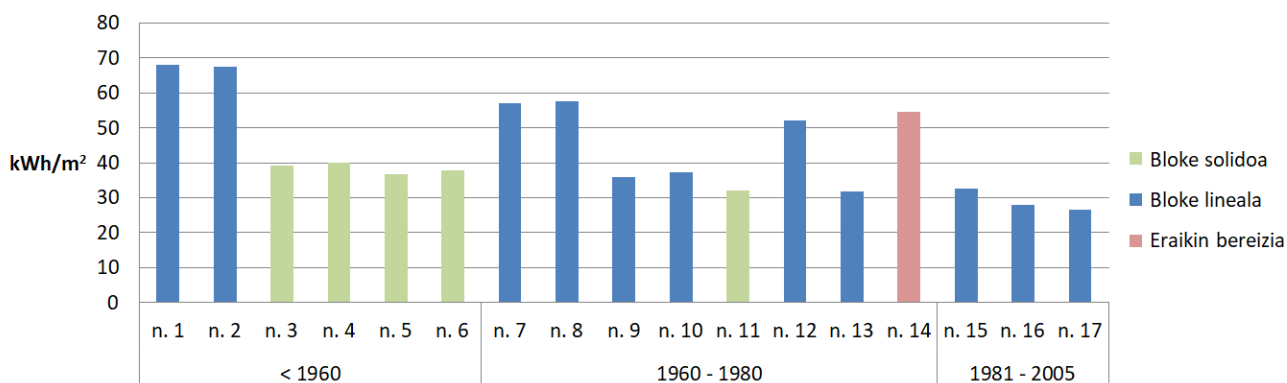
18. Taula: eraikuntza-aldiaren arabera batez besteko berokuntza-eskariak.

|                   | Urteko berokuntza eskaria<br>(kWh/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------|--|
| 1960a baino lehen | 48,99  |
| 1960 - 1980       | 42,35  |
| 1981 - 2005       | 29,38  |

Halaber, eraikuntza-aldiaz gain eraikina kokatuta dagoen hiri-morfologia, eta honen arabera jarraitutasuna, eraikin baten urteko berokuntza-eskaria baldintzatzen duten faktore garrantzitsuak direla egiaztatu da. Euren jarraitutasun handiagoa dela eta, bloke solidoetako eraikinek bloke linealetan kokatutakoak eta eraikin bereziak baino berokuntza-eskari txikiagoa dute. Adibidez, fatxada-konposizio bera eta antzeko dimentsioekin, baina hiri-forma desberdinarekin, 1. Arketipoaren (bloke lineala) berokuntza-eskaria 4. Arketipoarena (bloke solidoa) baino %70 handiagoa da.

17. Irudiak lortutako berokuntza-eskariaren emaitzak eraikuntza-aldia eta hiri-morfologiaren arabera adierazten dira. Bloke lineala urdinez, bloke solidoa berdez eta eraikin bereziak gorritz. Ikus daitekeenez, hiri-formaren eragina urteko berokuntza-eskariaren eraikuntza-aldiarenaren bestekoa izan daiteke.

### Urteko berokuntza eskaria



17. Irudia: eraikin-arketipoen urteko berokuntza-eskariak, eraikuntza-aldia eta hiri-morfologiaren arabera.

Bizitegi-parkearentzat lortutako 43,08 kWh/m<sup>2</sup>-ko urteko batez besteko berokuntza-eskaria kontsumo terminoetara pasatzeko, %86,89ko sasoiko batez besteko efizientzia kontsideratzen da, Bilboko berokuntza-sistemaren banaketan [50] eta IDAEk emandako erreferentziazko efizientzietan [54] oinarrituz. Horrela, 49,58 kWh/m<sup>2</sup>-ko batez besteko berokuntza-kontsumoari lortzen da bizitegi-parkearentzat.

Emaitza hori bildutako baliozkotze-datuekin alderatzen dira. 19. Taulak erakusten duen moduan, lortutako batez besteko berokuntza-kontsumoa oso hurbil dago erregai-kontsumoaren inkestaren eta literaturaren balioetatik: inkestaren emaitza baino %1 handiagoa

da, UBSan oinarritutako metodoa kontuan hartuta, eta %10 handiagoa etxe-erabileren araberako erregai kontsumoaren banaketaren ikuspegia kontsideratuz.

19. Taula: modelizatutako berokuntza-kontsumoaren alderaketa baliozkotze-datuekin.

| Urteko batez besteko berokuntza-kontsumoa (kWh/m <sup>2</sup> ) |                          |                              |   |                                     |
|---|--------------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|
| Eraikinen modelizazioaren emaitza                               | Literatura               | Erregai-kontsumoaren inkesta |   | Energia-eraginkortasun ziertagiriak |
|   | SECH-SPAHOUSEC proiektua | UBSan oinarritutako metodoa  | Etxe-erabileren araberako banaketarekin |                                     |
| 49,58   | 44                       | 48,98                        | 44,67                                   | 138,54                              |

Energia-eraginkortasun ziertagiritatik lortutako balioa, ordea, gainerakoak baino bizpahiru aldiz handiagoa da. Erdietsitako diferentzia hori, ziertagiriko eta benetako energia jardueren artekoa, bat dator literaturan aurki daitezkeen zenbait ikerketekin [92] [93]. Horren jatorria, hein handi batean, arauk ezarritako faktoreetan eta ziurtapenean maiz erabilitako balio lehenetsietan aurki daiteke. Egiaztatu da, beraz, energia-ziurtapenaren prozedurak nabarmen gain-balioesten duela etxebizitza baten energia-kontsumoa, eta ezin dela eraikinen energia-ereduak baliozkotzeko erabili.

Halaber, modelatutako berokuntza-eskariaren eraikuntza-aldiaren araberako batez bestekoak erregresioaren emaitzekin konpara daitezke (20. Taula). Azken honetan, 0,51eko determinazio-koefizientea lortu da, doitze moderatu bat adierazten duena. Erregresio eredia oro har esanguratsua da 0,022ko p-balioarekin eta aldagai guztietan hipotesi nulua baztertzen da 0,01eko  $\alpha$  baliorako. Bestalde, hondakinen independentziaren hipotesia Durbin-Watson testaren bidez aztertu da, eta lortutako 2,16ko balioa auto-korrelaziorik eza frogatzen du. Linealtasun eta homogeneotasun hipotesiak ere egiaztatu dira hondakinen sakabanatze-grafikoaren bidez.

20. Taula: modelatutako berokuntza-eskariaren alderaketa erregresioaren emaitzekin.

| Eraikitze-aldia   | Modelatutako berokuntza-eskaria (kWh/m <sup>2</sup> ) | Erregresiotik lortutako berokuntza-eskaria (kWh/m <sup>2</sup> ) | Aldea (%) |
|-------------------|---|--|-----------|
| 1960a baino lehen | 48,99   | 50,83  | - %3,8    |
| 1961 - 1980       | 42,35   | 45,47  | - %7,4    |
| 1981 - 2005       | 29,38   | 24,27  | + %17,4   |

Ikus daitekeenez, 1960 baino lehenagoko eraikinei dagozkien berokuntza-eskariak oso antzekoak dira, eta baita Desarrollismo garaikoei dagozkionak ere. 1981etik geroztik eraikitako eraikinen kasuan eraikin-arketipoen bidez modelatutako eskaria pixka bat handiagoa da erregresioarekin kalkulaturakoa baino.

Hala ere, modelatutako 1981etik 2005erako eraikin-arketipoen urteko batez besteko berokuntza-eskaria, 29,38 kWh/m<sup>2</sup>, 33,81 kWh/m<sup>2</sup>-ko kontsumoari dagokio; hau da, bizilagunen portaera energetikoa kalibratzeko erabilitako lau eraikin errealean (guztira 107

etxebizitzan) batez besteko energia-kontsumoa, 32,13 kWh/m<sup>2</sup>, baino %5 handiagoa baino ez da. Beraz, erregresiotik lortutako eskariarekiko aldea prozesu horretan sartutako lagin-kopuru mugatuak eragin dezake, eta baita 1981-2005 aldiko eraikinek bizitegi-parkean duten kuota txikiagoak ere, hauentzat zehaztasun gutxiagoko emaitza itzuliz.

Bestalde, eraikin-arketipoentzako lortutako emaitzak bizitegi-parke osoari estrapolatu zaizkio, berokuntza-eskari ezberdinak eraikin-arketipo bakoitzaren deskribapenarekin bat datozen etxebizitzan kopuruarekin biderkatuz. 21. Taulan ikus daitekeenez, lortutako Bilboko berokuntza-eskari osoa eta 2004-2017 aldiko kontsumo errealetatik ondorioztatutakoa oso antzekoak dira, euren arteko aldea %4koa baino ez izanik.

21. Taula: modelatutako bizitegi berokuntza-eskari agregatuaren alderaketa Bilboko datu historikoarekin.

|   |         |
|---|---------|
| <b>Bizitegi berokuntza-eskaria (MWh)</b>              | 461.584 |
| Bilboko 2004 – 2017 aldiko batzbestekoa               |         |
| <b>Modelatutako bizitegi berokuntza-eskaria (MWh)</b> | 481.915 |

Laburbilduz, metodologia Bilboko bizitegi-parkeari aplikatuz frogatu da proposatutako metodoa gai dela hiri-mailako egungo berokuntza kontsumoak zehaztasunez karakterizatzeko.

## 4.2 Bigarren fasearen emaitzak

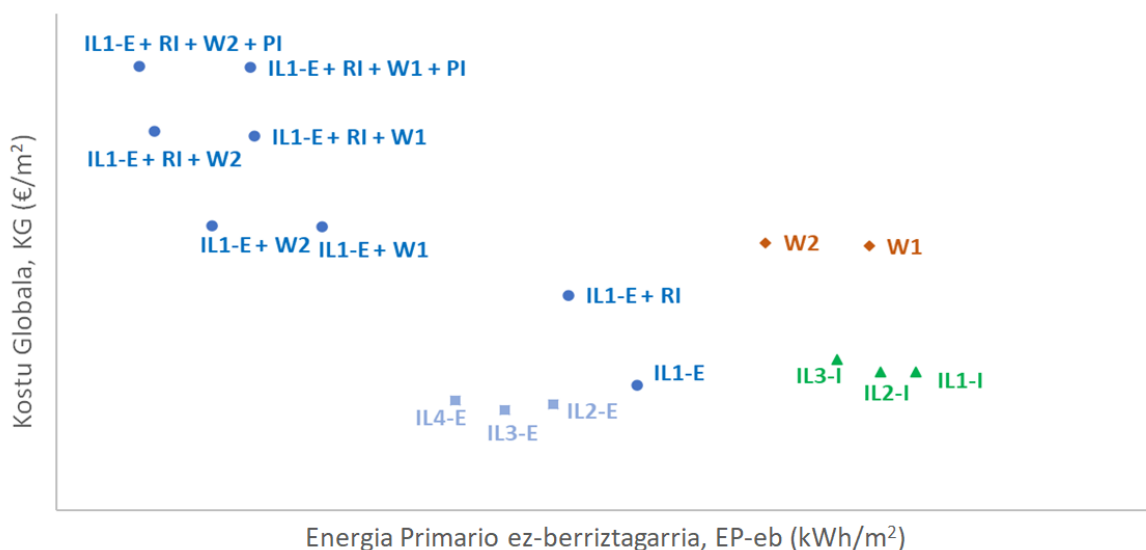
### 4.2.1 Energia berritze-paketeak

Berokuntza-eskarian EEN pasibo ezberdinen eragina alderatuz, fatxaden kanpo-isolamenduak energia aurrezpen handiena eragiten duela ikusten da. Efektu hori fatxadaren azalerarekin eta gaizki isolatutako (zaharragoak diren) fatxadekin areagotzen da. Eraikinaren arabera, fatxaden kanpo-isolamenduak berokuntza eskaria %19-%49 murriztu dezake. Transmittantzia ertaineko fatxadak dituzten eta bloke solidoetan dauden eraikinei dagokio beheko muga; haietan, lor daitekeen eskari-aurrezpena %13 eta %19 bitartean egon daiteke, gehitutako isolamenduaren lodieraren arabera. Bestetik, goiko mugak bloke linealetan kokatutako eta gaizki isolatutako eraikinei dagokie (%35-%47), eta baita transmittantzia maila ertaineko eraikin bereiziei ere (%31-%46). Bien bitartean, eraikin berriek (hobeto isolatuta daudenak), oro har bloke linealetan kokatzen direnak, bloke solidoetan kokatutako eta gaizki isolatutako eraikin zaharrenen (%24-%36) pareko aurrezpen-ahalmena dute (%22-37).

Aldiz, lotutako zubi termikoen igoeraren ondorioz, fatxaden barne-isolamenduek eraginkortasun askoz ere txikiagoa dute, kanpotik jarritako pareko isolamendu mailarekin lor daitekeen aurrezpen erdiaren ingurukoa. Halere, leihoak aldatzeak asko murrizten du berokuntzarako energia-eskaria, transmittantzia termikoaren eta airearen infiltrazio tasaren hobekuntzak eraginda. Eskari-aurrezpena hainbat eraikinetan beira bikoitzeko leiho sinpleak jarri lortutako %20tik, beira bikoitzeko E-baxuko leihoekin eraikin batzuetan lortutako %36ra artekoa da. Bestetik, teilatuaren eta barruko hormen isolamenduak ez du eragin nabarmenik izan berokuntza-eskarian.

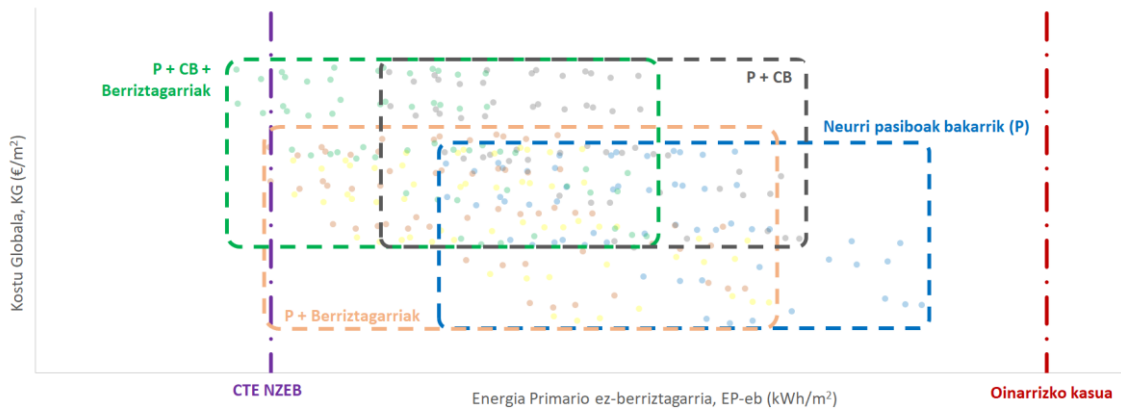
Aurrezki horiek EP-eb terminoetan txikiagoak dira, UBSren kontsumoa ere kalkuluan sartzen denean. 18. Irudian EEN pasiboko hainbat pakete ezberdinekin lortutako EP-eb kontsumoaren

eta KGaren aldaketak ikus daitezke. Neurrien pakete desberdinen EP-eb eta KG balioak eraikin motaren arabera alda daitezke, baina 18. Irudian ikus daitezkeen patrioiak kualitatiboki EE guztiei aplikatu ahal zaizkie, erabilera termikorako erregaia edozein delarik ere. Fatxaden kanpo-isolamendu optimoa 7-8 cm-takoa dela ikusi da. Sistema elektrikoak dituzten EEetan optimo hori nabarmenagoa da; GNren kontsumitzaileetan, ordea, KG minimoaren tartea zabalagoa da, optimoaren inguruko isolamendu maila ezberdinen KG parekoa izanik. Bestalde, bi motatako leihoek antzerako emaitzak lortu dituzte KG aldetik, bata edo bestea gaitetik egonik EEren arabera. Halere, E-baxuko leihoek EP- eb aurrezpen gehigarri aipagarriak dituzte beira bikoitzeko leiho simple baten ondoan. Halaber, aldi berean leihoa aldatzea eta fatxada isolatzeak EP-eb aurrezpen osagarri aipagarriak eragin ditzake, kasu horietan KG asko handitzen den arren. Edonola ere, teilatua eta barruko hormak isolatzea baino askoz ere eraginkorragoa izango litzateke zeinak, antzerako KGrekin, EP-eb aldetik hobekuntza txikia eragiten duten. Guztira, kanpotik isolatutako fatxada duen eraikin batean, E-baxuko beira bikoitzeko leihoek eta teilatua eta barruko hormak isolatzeak EP-ebren %28 eta %39 bitarteko aurrezpen osagarria eragin dezakete, EEren arabera.



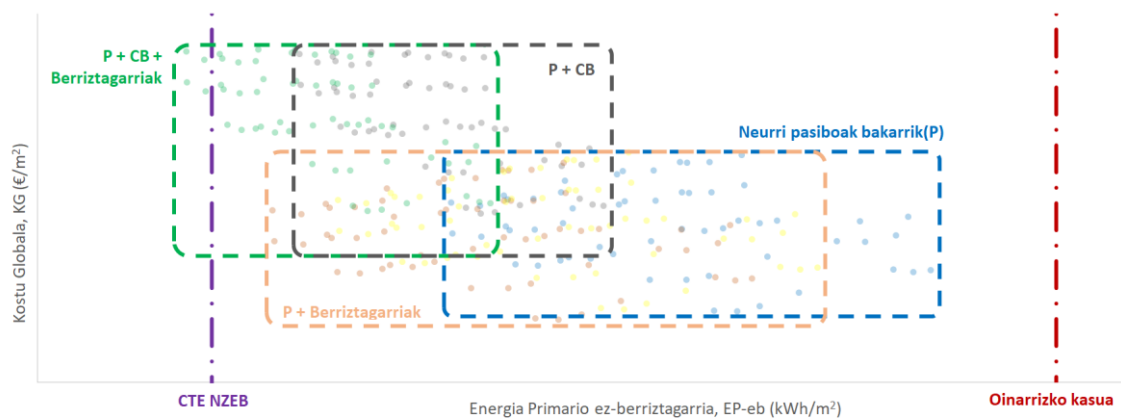
18. Irudia: berritze-pakete pasiboekin lortutako EP-eb eta KGen mapa.

Bestalde, eraikinen energia-sistemetan egindako esku-hartzeen efektuak 19. Irudian eta 20. Irudian laburbiltzen dira, zeinak perspektiba mikroekonomikoan lor daitezkeen EP-eb eta KG mailen ikuspegi kualitatibo bat ematen duten, GN eta elektrizitatea kontsumitzen duten eraikinetan, hurrenez hurren. Eraikina zenbat eta hobeto isolatuta egon, kondentsaziozko galdara bat jartzearen eragina txikitu egiten dela ikus daiteke; aldiz, energia berriztagarriek eraikinaren EP-eb kontsumoan eragin aipagarria dute, eraikina ongi isolatuta badago ere. Gainera, energia iturri berriztagarriak erabiltzen ez diren bitartean, ikusten da esku-hartzeen ondoriozko eraginkortasuna ez dela inola ere gerturatuko NZEB mailetara. Halaber, aipatu beharra dago, erabilera termikoetan elektrizitatea erabiltzen duten eraikinek NZEB kontsumo mailak lortzeko, ezinbestekoa dela energia iturri berriztagarriak ezartzeaz gain, sistema termikoa GNera aldatzea.



19. Irudia: neurri-paketeek eragindako efektuen ikuspegi pribatu kualitatiboa, GN kontsumitzen duten Eetan.

Oro har, helburu termikoetarako elektrizitatea kontsumitzen duten eraikinetan, kostu-maila optimoak neurri pasiboen eta eguzki energia termikoaren konbinazioarekin lortzen dira. Azken honek UBS eskaria hein handi batean asetzeari laguntzen du, bestela elektrizitate kontsumo garesti bat eragingo zuena. Aldiz, GN kontsumitzen duten eraikinen kostu-maila optimoak heterogeneoagoak dira. Kasu batzuetan, eraikinen fatxada-isolamenduaz osatuta daude soilik; beste batzuetan horren eta sistema berriztagarriaren baten konbinazioa dira. Azken hauen barruan, eguzki-kolektore termikoak eta sistema fotovoltaikoak oso antzerako KG dituzte, sistema fotovoltaikoentzat aurreikusitako auto-erabilerarekin. Halere, sistema fotovoltaikoen ustiapena optimizatuz gero, autokontsumoa areagotuz (eta, ondorioz, sarera gehitutako soberakina murriztuz), sistema horren onurak eguzki kolektore termikoen ondoan areagotuko litzateke.



20. Irudia: neurri-paketeek eragindako efektuen ikuspegi pribatu kualitatiboa, sistema termiko elektrikoak dituzten Eetan.

#### 4.2.2 Kostu-maila optimoak

Kalkuluaren emaitzek 59,01 kWh/m<sup>2</sup> eta 50,34 kWh/m<sup>2</sup>-ko kostu-maila optimoak ematen dituzte ikuspegi pribatuan eta makroekonomikoan, hurrenez hurren; horiek erabilera termikoen egungo EP-eb kontsumoaren (116,10 kWh/m<sup>2</sup>) erdia inguru dira. Emaitza horiek ez dira gehiegi aldentzen Estatu mailako gobernuaren kalkuluetatik [17], zeinek apartamentu-blokeentzat 68,1 kWh/m<sup>2</sup> eta 39,0 kWh/m<sup>2</sup>-ko batez besteko kontsumo optimoak ematen dituen, hurrenez hurren, ikuspegi pribatuan (%10ko deskontu tasarekin) eta makroekonomikoan (%4ko deskontu tasarekin).



Hala ere, emaitzek agerian uzten dute kostu optimoko EP-eb kontsumoa asko aldatzen dela EE batetik bestera (22. Taula eta 23. Taula). Ikuspegi pribatua, 27,28 kWh/m<sup>2</sup> eta 70,56 kWh/m<sup>2</sup> bitartean dago GN kontsumitzen duten EEtan, eta 38,99 kWh/m<sup>2</sup> eta 91,49 kWh/m<sup>2</sup> bitartean, sistema termiko elektrikoak dituzten EEtan. Aipatu beharra dago, zenbait kasutan kostu-maila optimoa NZEBren mailari dagokiola edo honi gerturatzen zaiola. Beraz, klima-baldintza berberak eta eraikuntza soluzio antzerakoak badituzte ere, eraikinen ezaugarri geometriko, jarraitutasun eta erabilera termikoetarako erabilitako erregai ezberdinek kostu-maila optimoa nahiko alda dezakete.

22. Taula: GN kontsumitzen duten EEen kostu-maila optimoak.

|                          |          | ERREFERENTZIAKO AGERTOKIA   |                |        |                        | ENERGIAREN PREZIO ALTUEN AGERTOKIA <sup>4</sup> |                |        |                        | BRL AGERTOKIA <sup>4</sup>  |                |        |                        |
|--------------------------|----------|-----------------------------|----------------|--------|------------------------|---|----------------|--------|------------------------|-----------------------------|----------------|--------|------------------------|
|                          |          | EP-eb (kWh/m <sup>2</sup> ) | EP-eb aurrezt. | ΔKG    | Amortiz. epea (urteak) | EP-eb (kWh/m <sup>2</sup> )                     | EP-eb aurrezt. | ΔKG    | Amortiz. epea (urteak) | EP-eb (kWh/m <sup>2</sup> ) | EP-eb aurrezt. | ΔKG    | Amortiz. epea (urteak) |
| Ikuspegi pribatua        | EE 1-GN  | 70,56                       | %48,7          | %1,1   | -                      | 70,56   | %48,7          | -%2,0  | >28                    | 70,56                       | %48,7          | -%13,9 | 14,1                   |
|                          | EE 2-GN  | 62,43                       | %51,5          | %0,7   | -                      | 62,43   | %51,5          | -%2,6  | >28                    | 62,43                       | %51,5          | -%15,0 | 13,9                   |
|                          | EE 3-GN  | 56,80                       | %40,6          | -%3,3  | >28                    | 56,80   | %40,6          | -%5,5  | 22,5                   | 56,80                       | %40,6          | -%10,4 | 21,3                   |
|                          | EE 4-GN  | 52,55                       | %40,9          | -%1,4  | >28                    | 52,55   | %40,9          | -%3,7  | >28                    | 52,55                       | %40,9          | -%10,1 | 22,2                   |
|                          | EE 5-GN  | 52,96                       | %38,7          | -%1,1  | >28                    | 52,96   | %38,7          | -%3,4  | >28                    | 52,96                       | %38,7          | -%9,4  | >28                    |
|                          | EE 6-GN  | 51,03                       | %39,2          | -%0,7  | >28                    | 51,03   | %39,2          | -%3,2  | >28                    | 51,03                       | %39,2          | -%9,6  | 23,4                   |
|                          | EE 7-GN  | 66,97                       | %45,0          | %7,3   | -                      | 66,97   | %45,0          | %4,2   | -                      | 66,97                       | %45,0          | -%9,3  | 20,2                   |
|                          | EE 8-GN  | 60,98                       | %46,9          | %7,6   | -                      | 60,98   | %46,9          | %4,2   | -                      | 60,98                       | %46,9          | -%10,0 | 17,0                   |
|                          | EE 9-GN  | 54,13                       | %40,4          | %3,0   | -                      | 54,13   | %40,4          | %0,5   | -                      | 54,13                       | %40,4          | -%6,5  | 21,9                   |
|                          | EE 10-GN | 47,65                       | %44,1          | %2,2   | -                      | 47,65   | %44,1          | -%0,5  | >28                    | 47,65                       | %44,1          | -%7,8  | >28                    |
|                          | EE 11-GN | 27,28                       | %60,3          | %1,3   | -                      | 27,28   | %60,3          | -%2,4  | >28                    | 27,28                       | %60,3          | -%5,8  | 22,4                   |
|                          | EE 12-GN | 69,56                       | %39,3          | %3,9   | -                      | 69,56   | %39,3          | %1,4   | -                      | 69,56                       | %39,3          | -%12,0 | 18,5                   |
|                          | EE 13-GN | 52,37                       | %32,1          | %0,9   | -                      | 52,37   | %32,1          | -%1,0  | >28                    | 52,37                       | %32,1          | -%8,2  | >28                    |
|                          | EE 14-GN | 55,68                       | %50,5          | %3,7   | -                      | 55,68   | %50,5          | %0,3   | -                      | 55,68                       | %50,5          | -%14,1 | 15,7                   |
|                          | EE 15-GN | 50,07                       | %46,6          | %15,4  | -                      | 50,07   | %46,6          | %11,8  | >28                    | 50,07                       | %46,6          | -%3,2  | 21,4                   |
|                          | EE 16-GN | 45,17                       | %48,1          | %8,2   | -                      | 45,17   | %48,1          | %5,0   | >28                    | 45,17                       | %48,1          | -%4,3  | 21,8                   |
|                          | EE 17-GN | 44,47                       | %47,7          | %12,7  | -                      | 44,47   | %47,7          | %9,2   | >28                    | 44,47                       | %47,7          | -%3,9  | 16,5                   |
| Ikuspegi makroekonomikoa | EE 1-GN  | 67,27                       | %51,1          | -%13,5 | 23,2                   | 67,27   | %51,1          | -%15,4 | 21,7                   | 67,27                       | %51,1          | -%21,6 | 11,9                   |
|                          | EE 2-GN  | 62,43                       | %51,5          | -%15,3 | 22,3                   | 62,43   | %51,5          | -%17,3 | 20,7                   | 62,43                       | %51,5          | -%23,6 | 11,8                   |
|                          | EE 3-GN  | 40,30                       | %57,9          | -%14,6 | 20,7                   | 40,30   | %57,9          | -%16,9 | 19,2                   | 40,30                       | %57,9          | -%18,4 | 16,3                   |
|                          | EE 4-GN  | 34,31                       | %61,4          | -%14,9 | 21,7                   | 34,31   | %61,4          | -%17,4 | 20,2                   | 34,31                       | %61,4          | -%19,6 | 16,8                   |
|                          | EE 5-GN  | 32,53                       | %62,4          | -%14,2 | 22,4                   | 32,53   | %62,4          | -%16,6 | 20,8                   | 32,53                       | %62,4          | -%18,6 | 18,7                   |
|                          | EE 6-GN  | 32,44                       | %61,3          | -%13,6 | 22,8                   | 32,44   | %61,3          | -%16,0 | 21,3                   | 32,44                       | %61,3          | -%18,3 | 17,5                   |
|                          | EE 7-GN  | 65,32                       | %46,3          | -%8,2  | >28                    | 65,32   | %46,3          | -%10,1 | 24,7                   | 65,32                       | %46,3          | -%17,2 | 15,9                   |
|                          | EE 8-GN  | 60,98                       | %46,9          | -%8,9  | >28                    | 60,98   | %46,9          | -%11,0 | 24,6                   | 60,98                       | %46,9          | -%18,4 | 13,8                   |
|                          | EE 9-GN  | 34,67                       | %61,8          | -%6,9  | >28                    | 34,67   | %61,8          | -%9,4  | 24,4                   | 34,67                       | %61,8          | -%12,2 | 17,0                   |
|                          | EE 10-GN | 30,59                       | %64,1          | -%11,6 | 23,7                   | 30,59   | %64,1          | -%14,4 | 22,0                   | 30,59                       | %64,1          | -%17,0 | 18,3                   |
|                          | EE 11-GN | 27,28                       | %60,3          | -%13,8 | 21,0                   | 27,28   | %60,3          | -%16,4 | 19,5                   | 27,28                       | %60,3          | -%17,5 | 16,9                   |
|                          | EE 12-GN | 53,29                       | %53,5          | -%10,2 | >28                    | 53,29   | %53,5          | -%12,3 | 24,2                   | 53,29                       | %53,5          | -%19,0 | 14,9                   |
|                          | EE 13-GN | 24,91                       | %67,7          | -%9,3  | >28                    | 24,91   | %67,7          | -%12,0 | 24,2                   | 24,91                       | %67,7          | -%14,3 | 19,9                   |
|                          | EE 14-GN | 52,88                       | %53,0          | -%13,6 | 24,7                   | 52,88   | %53,0          | -%15,7 | 23,2                   | 52,88                       | %53,0          | -%23,1 | 13,1                   |
|                          | EE 15-GN | 50,07                       | %46,6          | -%3,6  | >28                    | 50,07   | %46,6          | -%5,7  | >28                    | 50,07                       | %46,6          | -%13,5 | 18,1                   |
|                          | EE 16-GN | 45,17                       | %48,1          | -%7,9  | 24,7                   | 45,17   | %48,1          | -%9,9  | 23,1                   | 45,17                       | %48,1          | -%14,6 | 17,4                   |
|                          | EE 17-GN | 44,47                       | %47,7          | -%5,2  | >28                    | 44,47   | %47,7          | -%7,3  | >28                    | 44,47                       | %47,7          | -%14,1 | 17,7                   |

<sup>4</sup> Energia prezio altuen eta eta BRL agertokiak 4.2.4 eta 4.2.5 ataletan deskribatzen dira, hurrenez hurren.



23. Taula: sistema termiko elektrikoak dituzten EEn kostu-maila optimoak.

|                          |         | ERREFERENTZIAKO AGERTOKIA   |                |        |                        | ENERGIAREN PREZIO ALTUEN AGERTOKIA <sup>5</sup> |                |        |                        | BRL AGERTOKIA <sup>5</sup>  |                |        |                        |
|--------------------------|---------|-----------------------------|----------------|--------|------------------------|---|----------------|--------|------------------------|-----------------------------|----------------|--------|------------------------|
|                          |         | EP-eb (kWh/m <sup>2</sup> ) | EP-eb aurrezt. | ΔKG    | Amortiz. epea (urteak) | EP-eb (kWh/m <sup>2</sup> )                     | EP-eb aurrezt. | ΔKG    | Amortiz. epea (urteak) | EP-eb (kWh/m <sup>2</sup> ) | EP-eb aurrezt. | ΔKG    | Amortiz. epea (urteak) |
| Ikuspegi pribatua        | EE 1-E  | 91,49                       | %51,1          | -%10,3 | 22,7                   | 91,49   | %51,1          | -%15,2 | 20,3                   | 91,49                       | %51,1          | -%22,0 | 12,0                   |
|                          | EE 2-E  | 87,80                       | %49,9          | -%10,5 | 22,7                   | 87,80   | %49,9          | -%15,2 | 20,3                   | 87,80                       | %49,9          | -%22,5 | 11,4                   |
|                          | EE 3-E  | 48,83                       | %62,5          | -%10,9 | 21,9                   | 48,83   | %62,5          | -%17,1 | 19,7                   | 48,83                       | %62,5          | -%16,9 | 17,3                   |
|                          | EE 4-E  | 44,34                       | %63,4          | -%10,4 | 22,7                   | 44,34   | %63,4          | -%16,7 | 20,3                   | 44,34                       | %63,4          | -%17,5 | 17,3                   |
|                          | EE 5-E  | 44,24                       | %62,4          | -%12,0 | 21,5                   | 44,24   | %62,4          | -%18,1 | 19,4                   | 44,24                       | %62,4          | -%18,3 | 16,7                   |
|                          | EE 6-E  | 44,12                       | %61,3          | -%10,9 | 22,2                   | 44,12   | %61,3          | -%17,0 | 19,9                   | 44,12                       | %61,3          | -%17,7 | 16,9                   |
|                          | EE 7-E  | 88,84                       | %46,3          | -%4,1  | >28                    | 88,84   | %46,3          | -%9,2  | 23,7                   | 88,84                       | %46,3          | -%17,4 | 13,6                   |
|                          | EE 8-E  | 86,29                       | %44,7          | -%3,9  | >28                    | 86,29   | %44,7          | -%8,8  | 24,0                   | 86,29                       | %44,7          | -%17,7 | 13,1                   |
|                          | EE 9-E  | 70,23                       | %43,2          | -%6,4  | 23,0                   | 47,16   | %61,8          | -%10,4 | 23,3                   | 70,23                       | %43,2          | -%14,7 | 14,6                   |
|                          | EE 10-E | 44,56                       | %61,6          | -%8,8  | 23,7                   | 44,56   | %61,6          | -%15,2 | 21,1                   | 44,56                       | %61,6          | -%17,0 | 17,3                   |
|                          | EE 11-E | 44,16                       | %52,8          | -%10,0 | 21,5                   | 44,16   | %52,8          | -%15,2 | 19,4                   | 44,16                       | %52,8          | -%15,6 | 16,6                   |
|                          | EE 12-E | 76,48                       | %50,9          | -%7,9  | 24,4                   | 76,48   | %50,9          | -%13,1 | 21,6                   | 76,48                       | %50,9          | -%20,7 | 12,4                   |
|                          | EE 13-E | 38,99                       | %62,8          | -%8,0  | 23,9                   | 38,99   | %62,8          | -%14,6 | 21,2                   | 38,99                       | %62,8          | -%15,6 | 20,9                   |
|                          | EE 14-E | 75,73                       | %50,5          | -%10,5 | 22,9                   | 75,73   | %50,5          | -%15,4 | 20,5                   | 75,73                       | %50,5          | -%23,6 | 10,7                   |
|                          | EE 15-E | 68,09                       | %46,6          | %1,1   | >28                    | 68,09   | %46,6          | -%4,6  | >28                    | 68,09                       | %46,6          | -%13,6 | 15,1                   |
|                          | EE 16-E | 61,44                       | %48,1          | -%5,6  | 24,6                   | 61,44   | %48,1          | -%10,7 | 21,7                   | 61,44                       | %48,1          | -%15,5 | 15,0                   |
|                          | EE 17-E | 60,48                       | %47,7          | -%1,4  | >28                    | 60,48   | %47,7          | -%7,0  | 24,7                   | 60,48                       | %47,7          | -%14,6 | 15,3                   |
| Ikuspegi makroekonomikoa | EE 1-E  | 55,07                       | %70,6          | -%22,7 | 21,6                   | 55,07   | %70,6          | -%28,4 | 20,0                   | 55,07                       | %70,6          | -%29,2 | 10,8                   |
|                          | EE 2-E  | 87,80                       | %49,9          | -%23,7 | 17,9                   | 41,00   | %76,6          | -%27,3 | 22,1                   | 87,80                       | %49,9          | -%30,3 | 10,4                   |
|                          | EE 3-E  | 48,83                       | %62,5          | -%25,7 | 17,5                   | 42,04   | %67,7          | -%29,8 | 18,5                   | 48,83                       | %62,5          | -%28,8 | 14,7                   |
|                          | EE 4-E  | 44,34                       | %63,3          | -%26,0 | 17,9                   | 37,71   | %68,8          | -%30,2 | 18,8                   | 44,34                       | %63,3          | -%29,8 | 14,6                   |
|                          | EE 5-E  | 44,24                       | %62,4          | -%26,7 | 17,2                   | 38,07   | %67,6          | -%30,5 | 18,4                   | 44,24                       | %62,4          | -%30,1 | 14,2                   |
|                          | EE 6-E  | 44,12                       | %61,3          | -%25,9 | 17,6                   | 37,88   | %66,8          | -%29,7 | 18,7                   | 44,12                       | %61,3          | -%29,4 | 14,4                   |
|                          | EE 7-E  | 88,84                       | %46,3          | -%18,0 | 20,4                   | 43,78   | %73,5          | -%21,2 | 23,8                   | 88,84                       | %46,3          | -%25,4 | 12,1                   |
|                          | EE 8-E  | 86,29                       | %44,7          | -%17,6 | 20,7                   | 41,19   | %73,6          | -%19,4 | 24,6                   | 86,29                       | %44,7          | -%25,3 | 11,7                   |
|                          | EE 9-E  | 47,16                       | %61,8          | -%20,7 | 20,2                   | 39,64   | %67,9          | -%25,4 | 20,7                   | 47,16                       | %61,8          | -%25,0 | 16,6                   |
|                          | EE 10-E | 44,56                       | %61,6          | -%24,7 | 18,5                   | 37,25   | %67,9          | -%28,9 | 19,5                   | 44,56                       | %61,6          | -%29,0 | 14,6                   |
|                          | EE 11-E | 44,16                       | %52,8          | -%22,5 | 17,2                   | 37,13   | %60,3          | -%25,7 | 19,5                   | 44,16                       | %52,8          | -%25,5 | 14,2                   |
|                          | EE 12-E | 72,47                       | %53,5          | -%21,8 | 20,1                   | 37,75   | %75,8          | -%26,1 | 21,7                   | 72,47                       | %53,5          | -%28,8 | 11,2                   |
|                          | EE 13-E | 33,88                       | %67,7          | -%24,2 | 20,0                   | 33,88   | %67,7          | -%29,4 | 18,7                   | 33,88                       | %67,7          | -%28,2 | 16,8                   |
|                          | EE 14-E | 71,92                       | %53,0          | -%23,8 | 19,2                   | 71,92   | %53,0          | -%27,3 | 18,0                   | 71,92                       | %53,0          | -%31,0 | 9,8                    |
|                          | EE 15-E | 68,09                       | %46,6          | -%14,0 | 22,5                   | 68,09   | %46,6          | -%17,9 | 20,7                   | 68,09                       | %46,6          | -%22,1 | 13,7                   |
|                          | EE 16-E | 61,44                       | %48,1          | -%18,3 | 19,1                   | 44,33   | %62,6          | -%21,2 | 21,0                   | 61,44                       | %48,1          | -%23,8 | 13,1                   |
|                          | EE 17-E | 60,48                       | %47,7          | -%15,8 | 21,2                   | 60,48   | %47,7          | -%19,6 | 19,7                   | 60,48                       | %47,7          | -%23,1 | 13,3                   |

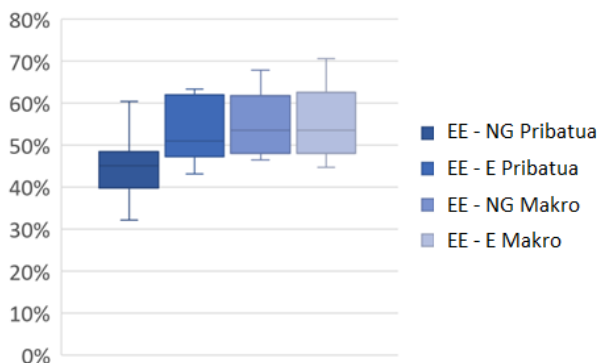
EE bakoitzak ordezkaten duen etxebizitza-kopurua kontuan izanik, kostu-maila optimo pribatuek guztira %48,4ko EP-eb aurrezpena eragingo lukete parkearen egungo kontsumoarekiko (24. Taula). Halere, aurrezpen hori ikuspegi ekonomikoaren eta erregaiaren arabera aldatzen da. 21. Irudiak identifikatutako kostu-maila optimoekin lortuko litzatekeen EP-eb aurrezpenen banaketa erakusten du. Ikuspegi pribatua, kostu-maila optimoekin lor daitekeen batez besteko EP-eb aurrezpena egun gas naturala erabiltzen duten EEn %44tik, elektrizitatea erabiltzen duten EEn %54ra bitartean dago. Ikuspegi makroekonomikoan, aldiz,

<sup>5</sup> Energia prezio altuen eta eta BRL agertokiak 4.2.4 eta 4.2.5 ataletan deskribatzen dira, hurrenez hurren.



aurrezpenak antzerakoak dira GN eta elektrizitatea erabiltzen duten EEetan (%56 eta %57, hurrenez hurren), bi kasuetan handiagoak izanik ikuspegi pribatuaren aldean.

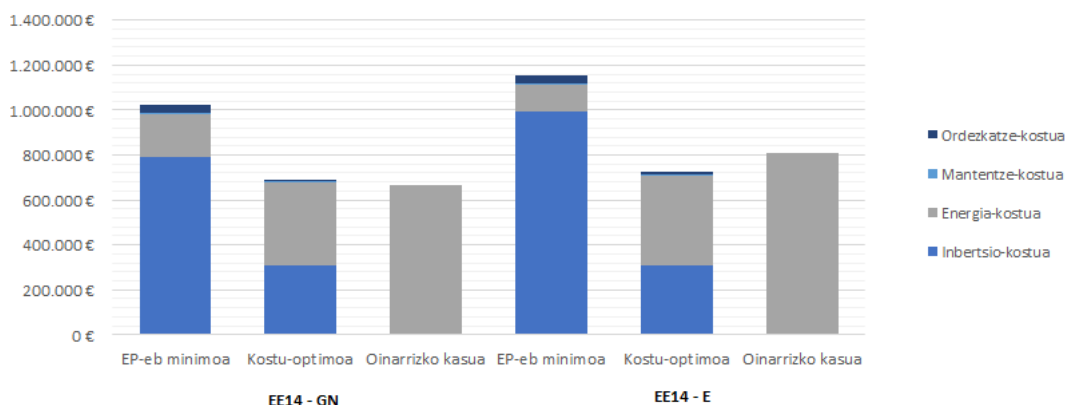
Hortaz, ikuspegi pribatuaren eta makroekonomikoaren kostu-maila optimoen alde nabarmena da GN erabiltzen duten EEetan. Horrek esan nahi du beharrezkoa izan daitekeela nolabaiteko finantza laguntza eraginkortasun energetikoko inbertsio batzuk ekonomikoki interesgarriak izan daitezkeen erabiltzaileentzat.



#### 21. Irudia: kostu-maila optimoekin lortuko litzatekeen EP-eb aurrezpenen banaketa.

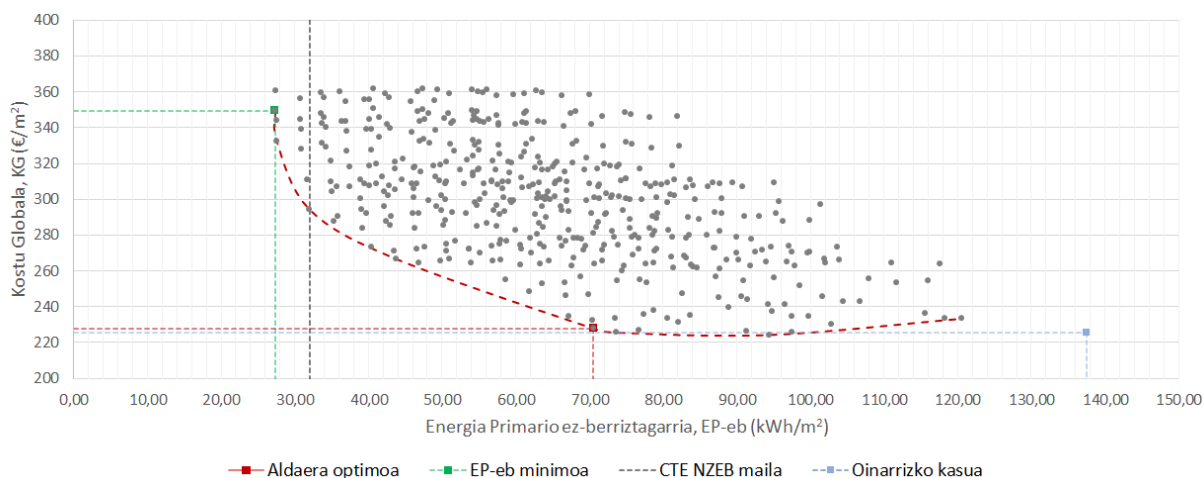
Izan ere, aipatu beharra dago GN erabiltzen duten EEn aldaera optimo pribatuen KGak oinarrizko kasuen KGen oso antzerakoak direla. EE askotan, 1960 osteko eraikin ia guztietan, lehena bigarrena baino zertxobait handiagoa ere bada; beraz, eraginkortasun energetikoaren arloan jardutea okerrerako izan daiteke ikuspegi ekonomikotik. GN kontsumitzen duten EEetan, aldaera optimo pribatuen KG batez beste %3,3 altuagoa da oinarrizko egoeretan baino. Bestetik, erabilera termikoetarako elektrizitatea kontsumitzen duten EEetan, hori salbuespen bakarrean gertatzen da, 15. EEean (1981 ondorengo eraikina izanik, hobeekin isolatuen artean dago eta, ondorioz, haren eraginkortasun energetikoa hobetzeko marjina txikiagoa du). Emaitza horiek ikusita, Bilboko negu epelen (barnealdeko beste eskualdeetako eguraldi gogorragoaren aldean) eta inbertsioei aurre egiteko behar diren finantza kosteen konbinazioak, GNren prezio baxuekin batera (elektrizitatearekin alderatuz), eraginkortasun energetikoan jardutearen onura ekonomikoa muga dezake.

Adibide gisa, 22. Irudiak 14. EERI dagozkion hainbat berritze-paketeren KG banaketa erakusten du. EE14 - GN kasuan, kostu optimoko aldaerak oinarrizko kasua baino KG altuagoa duela egiaztatzen da; beraz, lortuko litzatekeen energia murrizketak ez luke beharrezkoa den inbertsioaren kostua gaindituko. Aldiz, elektrizitatearen prezio altuagoak EE14 - Eren energia kostua igotzen du eta, ondorioz, kostu optimoko aldaerak KG aurreztea eragiten dute oinarrizko kasuarekiko. KGren aurrezpen hori, edozein kasutan ere, txikia da sistema termiko elektrikoa duten EEn artean: aldaera optimo pribatuen KGren batez besteko aurrezpena %7,7koa da.



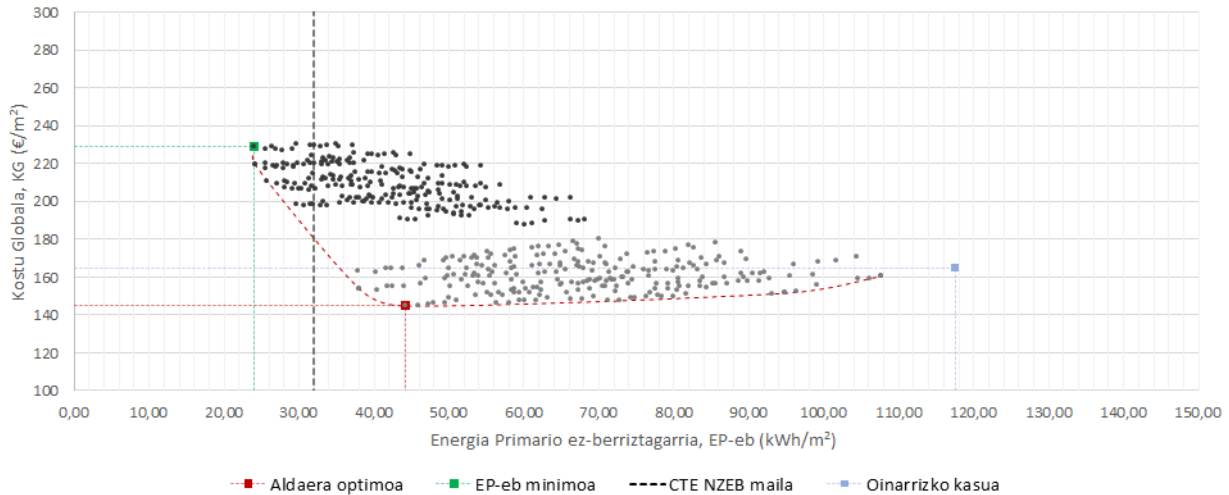
22. Irudia: 14. EERI dagozkion hainbat berritze-paketeren KG banaketa.

Gainera, GN kontsumitzen duten EEtan, KG pribatuaren kurba laua da nagusiki, kostu optimoaren inguruko tarte handi batean, non KGren aldaketa baxua den (oinarrizko kasuaren KGren gaineratik zein azpitik egon). 23. Irudian 1. EErentzat lortutako kurba jarri da adibide gisa. Horrek esan nahi du, gehiegizko laguntza publikoren beharrik gabe, EP-eb aurrezpen nabarmen bat sustatu daitekeela kurba lauaren ezker ertzeko esku-hartzeak marjinalki erakargarriak bihurtuz erabiltzaileentzat. Edonola ere, kostu-maila optimoa ezartzeko, 244/2012 Erregelamendu Delegatuak zehazten du hainbat esku-hartzeek antzerako KG badute, EP txikieneko hautatu beharko dela, analisi honetan egin den bezala.



23. Irudia: EE1 – GNrentzat lortutako KG kurba.

Aldiz, ikuspegi pribatu beraren barruan, berokuntzarako elektrizitatea erabiltzen duten EEn puntuen hodeiek eta kostu-kurbek forma nahiko desberdina dute. Oro har, esku-hartzeen kopuru handiago bat dago oinarrizko kasuaren KGtik behera, kurba gehiago makurtzen da kostu optimoko zonaren eskuin aldera eta optimo hau oinarrizko kasuaren puntutik urrutirako kokatzen da, EP-eb aurrezpen handiagoa eraginez. Alderdi horiek 24. Irudian ikus daitezke, non EE5 - Eren emaitzak adierazten diren.



**24. Irudia: EE5 - Erentzat lortutako KG kurba.**

Hala ere, kostu optimoaren esku-hartzei dagozkien amortizazio-epaek gehiegizkoak jarraitzen dute izaten, 21 urtetik gora baitaude EE guztientzat. Kasu batzuetan, kostu optimoen metodologiaren aplikazioaren barruan kontuan hartutako 28 urteko epea baino luzeagoak dira, eta horrek esan nahi du aldi horren amaieran lortutako hondar-balioari esker lortzen direla oinarrizko kasuenak baino KG txikiagoak.

24. Irudiako puntu ilunagoak berokuntza sistema elektrikoa GN instalazio oso berri batez aldatzea dakarten esku-hartzei dagozkie, kondentsazio-galdara eta erradiadoreen sistema barne hartuta. Balizko sistema-aldaketa horrek esku-hartzeen KG igotzea eragiten du, grafikoetan beste aldaera batzuetatik bereiztea ahalbidetuz. Halere, aipatu beharra dago GNezko instalazio berri honekin CTEaren NZEB kontsumo mailetara iritsi daitezkeela eraikin hauek.

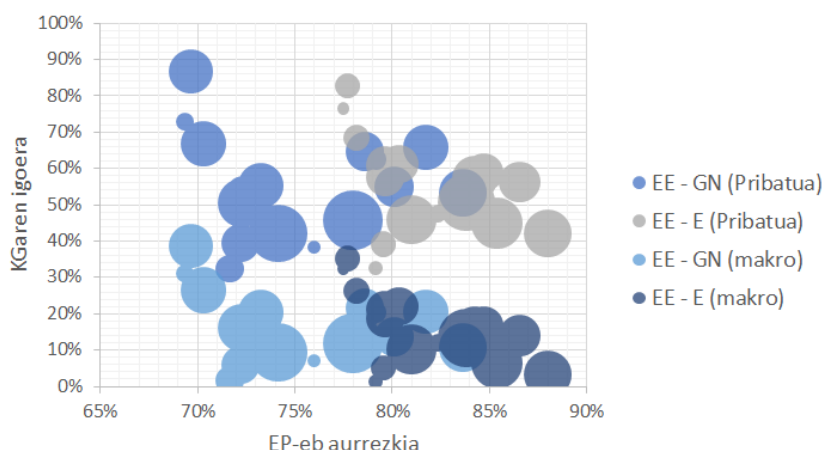
Bestalde, ikuspegi makroekonomikoak kostu optimo ezberdinak dakartza GN kontsumitzen duten EE gehienetan. Optimo horiek ikuspegi pribatukoak baino EP-eb kontsumo txikiagoa dute. Halaber, ikuspegi makroekonomiko honetan are nabarmenagoa da kostu optimoko gunea eta azken honek KG aurrezpen nabarmena adierazten du EE guztietan oinarrizko kasuarekiko; KG kurba ia lauaren joera ez da gertatzen. Aldiz, berokuntzarako elektrizitatea erabiltzen duten EEtan, ikuspegi makroekonomikoa ikuspegi pribatuarekin lerrokatuagoa dagoela ikusi da eta, oro har, emaitza optimo berberak ematen ditu, kostuei dagokienez. Halere, ikuspegi makroekonomikoak amortizazio-epe laburragoak ematen ditu kasu guztietan (altuak izaten jarraitu arren): 21 eta 17 urtetik gorakoak GN eta elektrizitatea erabiltzen duten EEtan, hurrenez hurren. Laburbilduz, ikuspegi makroekonomikoan lortutako kostu-maila optimoko esku-hartzeekin, PE-eb eta KG aurreztepenak %57,1 eta %16,23ra arte igotzen dira, hurrenez hurren (24. Taula).

24. Taula: agertoki desberdinetan balioetsitako batz besteko kostu-maila optimoko aldaerak.

|                          |                           | Erreferentziako agertokia | Energiaren prezio altuen agertokia | BRL agertokia |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|---------------|
| Ikuspegi pribatua        | EP-eb aurrezkia           | %48,4                     | %48,9                              | %48,4         |
|                          | CO <sub>2</sub> aurrezkia | %46,7                     | %47,1                              | %46,7         |
|                          | KG aurrezkia              | %1,97                     | %6,0                               | %13,2         |
| Ikuspegi makroekonomikoa | EP-eb aurrezkia           | %57,1                     | %62,4                              | %57,1         |
|                          | CO <sub>2</sub> aurrezkia | %56,2                     | %61,2                              | %56,2         |
|                          | KG aurrezkia              | %16,2                     | %19,3                              | %22,3         |

#### 4.2.3 NZEB berritze-mailak

Esku-hartze energetikoen bidez lor daitekeen PE-eb aurrezpen maximoa 2050erako energia kontsumoa murrizteko Europako helburuaren neurrikoa da. Berokuntzarako gas naturala erabiltzen duten EEtan, batez beste %76 aurrez daiteke oinarrizko kasuekiko (%69 eta %84 bitartean EEaren arabera). PE-eb aurrezteko ahalmen hori %82ra igotzen da berokuntza elektrikoko sistemak dituzten EEtan (%77 eta %88 bitartean, EEaren arabera). Emaidza horiek 25. Irudian adierazi dira, non zirkuluen tamainak EE mota bakoitzak bizitegi-parkean duen pisua adierazten duen. EE guztiak CTEk eraikin berrientzat ezarritako atalase-baliora iritsiko lirateke; hau da, zaharberitze energetiko baten bidez, eraikin guztiak NZEB bihurtzeko Espainiako definizioan oinarrituta.

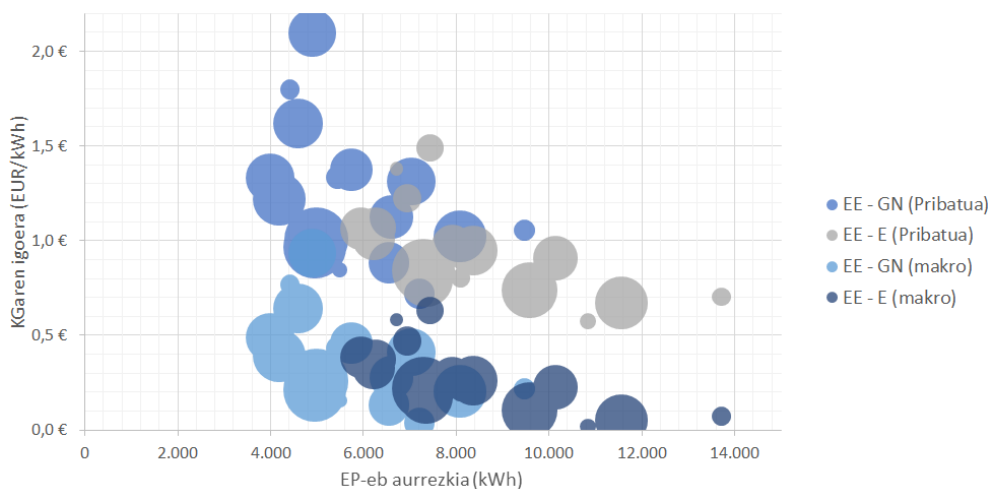


25. Irudia: birgaitze energetikoaren bidez lortu daitezkeen EP-eb aurrezki maximoak, horiekin lotutako KGaren igoeren arabera.

Halere, beharko litzakeen KG pribatuaren igoera, oinarrizko kasuarekiko, izugarri handia izango litzateke: %54 inguruko esfortzu ekonomiko gehigarria beharko litzateke. Batez besteko hori antzerakoa da GN eta elektrizitatea erabiltzen duten EEntzat. Aldiz, aipatu beharra dago KGren igoera hau askoz ere txikiagoa dela ikuspegi makroekonomikoan, %15ekoa hain zuzen. Beraz, diferentzia nabarmena dago bi ikuspegiarten artean esku-hartze energetiko sakonen eragin ekonomikoan. Ikuspegi makroekonomiko batetik, NZEB bihurtzeko KGren igoera txiki bat baino behar ez duten EEk ere badaude, hasierako inbertsio gisa kontzentratuta bada ere.

Halaber, ahalegin ekonomiko horren eraginkortasuna ezberdina izango litzateke inbertitutako euro bakoitzeko lortutako EP-eb aurrezki unitarioari dagokionez. 26. Irudian aurreztutako EP-eb unitate bakoitzeko beharrezkoa den KGren igoera adierazten da, zaharberitutako etxebizitza bakoitzean lor daitekeen EP-eb aurrezpenaren aldean. "Aurreztutako kWh-ko

euroak” 2 eta 94 zentimoren artean daude ikuspegi makroekonomikoan, EE zaharrenak azpiko tartean eta berrienak goiko tartean egonik, hurrenez hurren. Bestetik, ikuspegi pribatuan lortutako erlazio baxuena 50 zentimoetatik gora dago.



**26. Irudia: aurreztutako EP-eb unitate bakoitzeko beharrezkoa den KGren igoera, birgaitutako etxebizitza bakoitzeko EP-eb aurrezkiaren arabera.**

Emaitza horiek bidez, epe luzera energia aurrezteko helburuekin bat datorren energia-eraginkortasunaren hobekuntza-maila sustatzeko beharrezkoak izan daitezkeen laguntza planen berri eman liteke. Hala ere, garrantzitsua da nabarmentzea ikuspegi makroekonomikoan ere, NZEB berritze-mailak lortzea ez litzatekela errentagarria izango onartutako erreferentziako agertokian. Esku-hartze sakon horiek errentagarri izateko beharrezkoa litzateke inbertsio-kostuak murriztea (ikasketa kurben eta eskalako ekonomien ondorioz), lehengai energetikoen prezioak altuagoak izatea eta finantzazio-interesak txikitzea.

#### 4.2.4 Energiaren prezio altuen agertokia

Sentikortasun azterketa bat burutu da GNren eta elektrizitatearen prezioen bilakaerak emaitzetan duen eragina zein den ikusteko. Horretarako, energia prezio altuagoko beste agertoki bat zehazten da, ereduaren gainerako parametroak finko mantentzen direlarik.

Azken urtean pairatutako neurrigabeko energia prezioei dagokionez, aipatu beharra dago salbuespeneko egoera geopolitiko baten ondorio direla. Egoera horren bilakaeraren eta EBak hartutako energia arloko azken erabakien arabera, oraindik ikusteke dago epe luzean izan dezakeen eragina. Izan ere, ikerketa honetan aztertutako aldia 28 urtekoa da eta, beraz, alde batera utzi da epe laburrean eman daitezkeen prezioen hegakortasuna.

CNMCren arabera [94], 2011-2018 bitartean Espainian elektrizitatearen prezioak izandako urteko batazbesteko igoera %3,2koa izan zen. Aldiz, erreferentziako agertokiaren urteko batez besteko igoera %1,81koa da. Beraz, beste agertoki honetan urteko %3ko igoera konstantea zehaztu da. GNri dagokionez, PNIECaren 2030 urterako aurreikuspenak erreferentziako agertokia zehazteko kontuan izandako gainerako analisiek baino lehengaien kostuen eboluzio nahiko handiagoa dakar [27]. Agertoki alternatibo honetan GNren prezioaren tarteko bilakaera definitu da, erreferentziako agertokiaren eta PNIECaren hipotesiaren artean.

Horrela, erabilera termikoentzat GN erabiltzen duten EEentzako lortutako kostu-maila optimoak ikuspegi pribatuan eta makroekonomikoan erreferentziako agertokian lortutako berberak dira (22. Taula); beraz, bi ikuspegien arteko diferentzia hor jarraitzen du. Kasurik onenean, amortizazio-epeak zertxobait hobetzen dira (1,5 urte inguruan), baina EE batzuen kasuan, kostu-maila optimoek errentagarriak izan gabe jarraitzen dute. Hortaz, emaitzek erakusten dute GNren prezio handiagoaren efektua mugatua dela.

Elektrizitatea kontsumitzen duten EEtan, kostu-maila optimo pribatuek eredu berari jarraitzen diote (23. Taula). Oro har, amortizazio-epeak 2-3 urtetan lubertzen dira. Halere, inpaktu nagusia kostuen-maila optimo makroekonomikoetan gertatzen da, zeinak PE-eb kontsumo baxuagoen tarteetan mugitzen diren. Hortaz, kostu-maila optimo pribatu eta makroekonomikoak erreferentziako agertokian lerrokatuta zeuden bitartean, diferentzia nabarmena sortu da energiaren prezio altuen agertokian (GN erabiltzen duten EEen antzerakoa).

#### 4.2.5 BRL agertokia

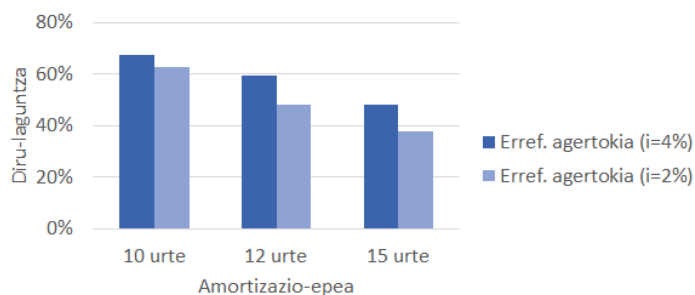
Erreferentziako agertokian, oinarrizko kasuak inolako birgaitzerik gabeko EEek adierazten dituzte. Halere, baliteke eraikin zahar batek fatxadaren mantentze esku-hartze bat beharrezkoa eta ezinbestekoa izatea. Egoera horretan, ordezeko EENen errentagarritasuna ebaluatzeko esparru ekonomikoa aldatzen da. Kasu honetan, EEen oinarrizko kasuetan oinarrizko esku-hartze maila bat zehaztu beharra dago (*Base Refurbishment Level*, BRL), zeinak zaharberritzeko beharra duen eraikin bati aplikatu dakioken gutxieneko berritze-maila adierazten duen. Azken hau 15 mm-ko geruza bakarreko mortero estaldura moduan definitu da, zeinaren propietate iragaztezin eta transpiragarriek fatxadaren jokabide higrotermiko egokia ahalbidetzen duten arren, ez dute haren isolamendu termikoa hobetzen. BRL honentzat 35 €/m<sup>2</sup>-ko kostua zenbatetsi da.

Agertoki honetan, aztertutako esku-hartzeen EP-eb kontsumoa eta KG erreferentziako agertokiko berberak jarraitzen dute izaten, oinarrizko kasuaren KG bakarrik aldatzen da. Beraz, KGren grafikoa ez da aldatzen eta kostu-maila optimoak erreferentziako agertokiarenak dira (22. Taula eta 23. Taula). Hala ere, kostu-maila optimoaren errentagarritasunaren ebaluazioa aldatzen da, oinarrizko kasuen kostua areagotzearen ondorioz, eta amortizazio-epearen murrizketa nabarmenak ikusten dira erreferentziako agertokiarekiko. Kasu honetan, kostu-maila optimoak oso errentagarriak dira EE guztietan, 14 eta 23 urte bitarteko amortizazio-epe pribatuekin GN kontsumitzaileentzat (12-18 urte ikuspegi makroekonomikoan), eta 11 eta 17 urte bitartekoa erabilera termikoentzat elektrizitatea kontsumitzen duten EEentzat (10-15 urte ikuspegi makroekonomikoan). Hortaz, birgaitze energetiko sakonenen errentagarritasuna oso adierazgarria dela egiaztatu da eraikinak fatxada zaharberritzea behar duen testuinguruan.

#### 4.2.6 Diru-laguntzak

Aurreko ataletan aurkeztutako emaitza ekonomikoek desberdintasun nabarmenak erakusten dituzte ikuspegi makroekonomikoaren eta pribatuaren artean; esku-hartze batzuk ez dira errentagarriak inbertitzaile pribatuarentzat eta, errentagarriak direnean, inbertsio horien amortizazio-epeak handiegiak dira. Horrek guztiak erakusten du laguntza publikoak behar direla birgaitze energetikoa jendearentzat erakargarria izan dadin.

27. Irudiak erakusten du kostu-maila optimo makroekonomikoak amortizazio-epe pribatu ezberdinekin lortzeko beharrezkoa izango litzatekeen diru-laguntza. Iterazio-prozesu bat egin da, diru-laguntzen maila handituz eta urrats bakoitzean nahi den amortizazio-epea lortzen den egiaztatuz. Diru-laguntza maila bakoitza sartzeak, bistan denez, ikuspegi pribatuaren maila optimoa etengabe aldatzea ekarriko luke eta, beraz, azterketa hau lortutako maila optimo makroekonomikoetan oinarritu da, maila horiek finkoak baitira. EE bakoitzarentzat kalkulua bi aldiz burutu da, %4ko erreferentziako finantzazio tasarekin eta %2ko tasa murriztu batekin.

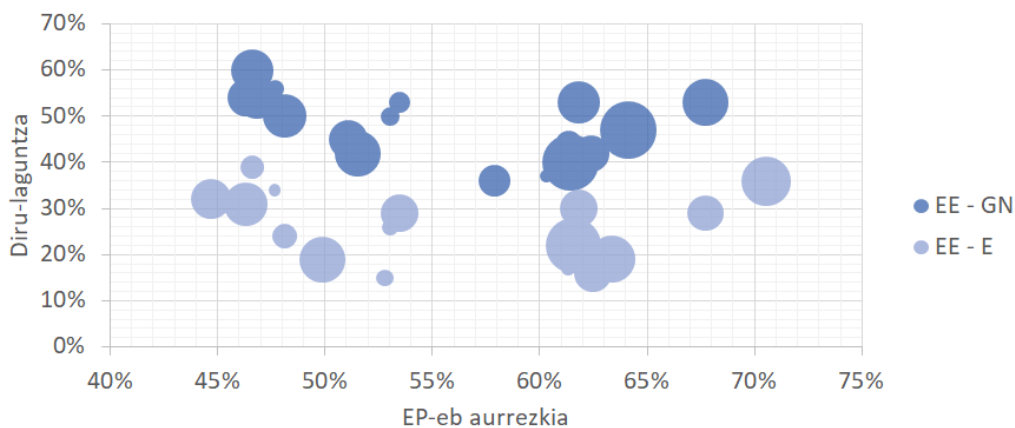


**27. Irudia: kostu-maila optimo makroekonomikoak amortizazio-epe pribatu ezberdinekin lortzeko beharrezkoa izango litzatekeen diru-laguntza.**

Inbertitzaile batentzat inbertsioa erakargarria izateko idealiki 10 urtetik gertuko amortizazio-epea beharrezkoa balitz ere, erreferentziako agertokiaren emaitzek erakusten dute era zabal batean sustatu ahalko litzatekeen amortizazio-epe laburrena 15 urtera mugatu beharko litzatekeela. Amortizazio-epe honek eskatzen dituen batez besteko diru-laguntzak nabarmenak dira jada, baina 10 urtetik gertuagoko amortizazio-epeak lortzeko beharrezkoak diren diru-laguntzak izugarri handitzen dira.

Bestalde, emaitzek diru-laguntza zuzenak interes baxuko maileguekin konbinatzearen onura adierazten dute. Azken hauen ekarpena ezinbestekoa da diru-laguntza zuzenak laguntza publikoko aurreko programekin aldera daitekeen tarte batean mantentzeko, non laguntzak inbertsioaren %30-35era irits daitezkeen [9]. %2ko finantzazio-tasarekin, erreferentziako agertokian beharrezkoa litzatekeen batez besteko diru-laguntza %38koa da.

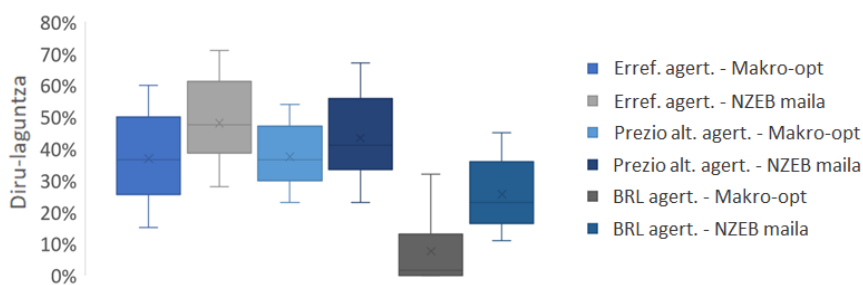
Halere, alde nabarmenak daude EE bakoitzak 15 urtetik beherako amortizazio-epea bermatzeko beharrezkoa duen diru-laguntza publikoen artean. 28. Irudian, EE bakoitzak behar duen diru-laguntzaren zatia adierazi da, %2ko finantzazio-tasa ontzat hartuz, esku-hartze energetiko horrek eragingo lukeen PE-eb aurrezpenaren ondoan. Zirkuluen tamainak etxebizitzaren kopurua adierazten du.



**28. Irudia: %2ko finantzazio-tasarekin EE bakoitzak behar duen diru-laguntzaren zatia, 15 urtetik beherako amortizazio-epea bermatzeko aldaera optimoetan.**

Ikus daitekeenez, sistema termiko elektrikoak dituzten EEk GN kontsumitzen duten EEk baino laguntza publiko gutxiago behar dute. Lehenengo kasuan laguntza hori ohiko diru-laguntzen tartean dago; aldiz, bigarrenetan inbertsioaren %48ra igotzen da batez beste. GN elektrizitatea baino merkeagoa izateak, GN erabiltzen duten EEn urteko gastu energetikoa sistema termiko elektrikoak dituztenena baino txikiagoa izatea eragiten du. Ondorioz, energia kontsumoaren murrizketa jakin bati lotutako aurrezpena txikiagoa da GNren kontsumitzaileentzat eta horrek amortizazio-epe handiagoak eragiten ditu antzerakoak diren inbertsioentzat. Ondorio nagusia da diru-laguntza handiagoak behar direla eraginkortasun energetikoko inbertsioak azken erabiltzailearentzat erakargarriak izan daitezen.

Prezio altuen agertokiak diru-laguntzen antzerako banaketa erakusten du 15 urterako amortizazio-epearentzat, 29. Irudian ikus daitekeenez. Agertoki honetako optimo makroekonomikoek erreferentziako agertokian baino energia aurrezpen handiagoa erakusten badute ere (24. Taula), behar diren diru-laguntzak antzerakoak dira bi agertokietan. Aldiz, BRL agertokian behar den laguntza asko murrizten da, hainbat EEk ez baitute laguntza publikorik behar 15 urteko amortizazio-epea bermatzeko.



**29. Irudia: diru-laguntzen banaketa 15 urteko amortizazio-epearentzat.**

Esku-hartze sakonagoetarako beharrezkoa izan daitekeen diru-laguntza gehigarria zenbatesteko, birgaitze energetiko maila sakonago bat aukeratu da EE bakoitzerako, NZEB tartean edo hurbil egonik, aurrezpenaren eta kostuen arteko konpromiso egokia adierazten duena. Esku-hartze maila horiek lortzeko beharrezkoak diren diru-laguntzen banaketa, zeinekin batez besteko 36,0 kWh/m<sup>2</sup>-ko PE-eb kontsumoa lortuko litzatekeen, 29. Irudian adierazten da hiru agertokietako bakoitzarentzat.



Aipatu beharra dago prezio altuen agertokian batez besteko diru-laguntza (%43), erreferentziako eta prezio altuko agertokietan kostu-maila optimora iristeko beharrezkoa den laguntzara hurbiltzen dela. Horrek esan nahi du produktu energetikoen kostuak inpaktu adierazgarria izan dezakela NZEB mailako esku-hartzeak aukeratzeko gaitasunean. Bestalde, azken hau bermatuta egongo litzateke, %25ko laguntza publiko batekin, berritu beharra duten eraikinetan.

Hala ere, etxeko energia-kontsumoak eragindako GHG emisioak murriztea baldin bada helburu nagusia, baliteke sistema termiko elektrikoak dituzten EEetan esku-hartze sakonak sustatzea (NZEB mailakoak) merezi ez izatea. Batetik, kostu optimoko esku-hartze makroekonomikoekin lortuko litzatekeen GHG emisioen aurrezpena merituzko %56,2ra iritsiko litzateke. Bestetik, aurreikusitako sare elektrikoaren deskarbonizazioak gainerako EP-eb kontsumoari lotutako emisioak minimizatuko lituzke berez. PNIECean oinarrituz, 2030eko elektrizitate *mix*-aren arabera  $0,08 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}_{\text{EF}}$  konbertsio faktorea zenbatetsi daiteke etxeetan kontsumitutako elektrizitaterako, egungo faktorearen laurdenari dagokiona. Hortaz, horrek kostu optimoko esku-hartzeak epe luzean %80-90 murrizteko helburuarekin lerrokatuko lituzke.

### 4.3 Hirugarren fasearen emaitzak

#### 4.3.1 Ereduaren estimazio emaitzak

DCE esperimentuaren emaitzen arabera, etxebizitzaren jabeek interes handia dute haien etxeak termikoki isolatzeko. Azpimarratu beharra dago, aukera-multzoen %86an inkestatuek fatxada isolatzeko bi aukeretako bat aukeratu dutela, eta %14ean bakarrik aukeratu dute birgaitzerik ez egitea. Inbertsio kostuen maila altua (12.000€) izan duten aukera-multzoetan ere, egungo egoera mantentzea aukeratu duten kasuak %17 baino ez dira. Fatxadaren berritze energetikoa burutzeko interes handi hori, neurri batean behintzat, DCE egin zen testuinguruak azal dezake. Izan ere, INEren datuen arabera, Espainiako etxeek aurrezpen tasa maximo historikora heldu ziren COVID-19ko krisialdian zehar [95]. Finantza-gaitasun horrek, azken hilabetetan Europak aurre egindako energiaren prezio altuen kezkarekin batera, etxeak eraginkortasun energetikoa handitzera bultzatu ditzake. Halaber, esan behar da inkesta neguan egin dela, etxeak berokuntza-gastuekiko sentikorrak izan daitezkeenean. Testuinguru makroekonomiko horretaz gain, diru-sarrera txikiagoak dituzten etxeak, emaitzen arabera birgaitzeko joera gutxiago dutenak, laginean gutxiegi aurkeztuta daude.

25. Taula:25. Taulak MXL ereduaren estimazioaren emaitzak aurkeztu ditu, erreferentzia gisa erabilitako MNL ereduarekin batera. Egiantza-ratioaren testa egin da bi ereduak elkarren artean konparatzeko. Espero bezala, emaitzek adierazten dute MXL-k MNL gainditzen duela ( $LR=308,2$ ,  $df=5$ ,  $p\text{-balioa}<0,001$ ), lehentasun-aldaketak egokitzeko zorizko parametroek eskaintzen duten malgutasuna agerian utziz. Halaber, zenbatetsitako MXL ereduak datuen arrazoizko doikuntza bat ematen du; lortutako  $0,37$ ko pseudo- $R^2$  koefizienteak doikuntza bikaina adierazten du [96] eta antzeko azterketekin aldera daiteke [97].

25. Taula: MXL ereduaren estimazioaren emaitza.

| Atributuak                               | MNL        | MXL           |                         |
|--|------------|---------------|-------------------------|
|  |            | Batazbestekoa | Desbideratze estandarra |
| Inbertsio-kostua (1,000€tan)             | -0,321 *** | -1,128 ***    | 0,609 ***               |
| <i>Diru-sarrera &lt; 35.000€</i>         | 0,109      | -0,132        |                         |
| Energia aurrezkia (%/urte)               | 0,080 ***  | 0,108 ***     | 0,086 ***               |
| <i>Diru-sarrera &lt; 35.000€</i>         | -0,036 **  | -0,048 *      |                         |
| Zuzeneko diru-laguntza (%an)             | 0,061 ***  | 0,084 ***     | 0,023 ***               |
| <i>Diru-sarrera &lt; 35.000€</i>         | -0,025 *** | -0,029 **     |                         |
| Finantziazio biguna ( <i>dummy</i> )     | 0,136 *    | 0,224 **      | 0,017                   |
| <i>Diru-sarrera &lt; 35.000€</i>         | 0,414 **   | 0,441 **      |                         |
| Kenkari fiskal handitua ( <i>dummy</i> ) | 0,677 ***  | 0,863 ***     | 0,065                   |
| <i>Diru-sarrera &lt; 35.000€</i>         | -0,544 *** | -0,569 **     |                         |
| ASC (isolatzea vs egungo egoera)         | -0,392     | 1,502 *       |                         |
| <i>55 – 65 bitarteko adina</i>           | 2,760 ***  | 4,293 ***     |                         |
| <i>65etik gorako adina</i>               | 1,990 ***  | 3,305 **      |                         |
| <i>Haurrak etxean</i>                    | 1,280 **   | 2,255 *       |                         |
| <i>Berokuntza sistema elektrikoa</i>     | -1,087 *   | -2,034 *      |                         |
| <i>“Beste” berokuntza sistema bat</i>    | -1,678 *** | -3,047 ***    |                         |
| Inkestatuak                              | 191        | 191           |                         |
| Behatutako hautaketak                    | 1.145      | 1.145         |                         |
| Egiantzaren logaritmoa                   | -948,9     | -794,83       |                         |
| Pseudo-R <sup>2</sup>                    | 0,25       | 0,37          |                         |
| AIC                                      | 1.929,85   | 1.631,59      |                         |
| BIC                                      | 2.010,55   | 1.737,49      |                         |

\* p < 0,1 mailako adierazgarritasun estatistikoa.

\*\* p < 0,05 mailako adierazgarritasun estatistikoa.

\*\*\* p < 0,01 mailako adierazgarritasun estatistikoa.

25. Taulan inbertsio-kostuarentzat adierazten diren batez bestekoa eta desbideratze estandarra inbertsio-kostuaren koefizientearen logaritmo naturalarenak dira, zeinak banaketa log-normala duen. Gainerako atributuen parametroek (urteko energia-aurrezkia, zuzeneko diru-laguntza publikoa, finantzaketaren interes-tasa eta kenkari fiskala) gizabanakoen artean banaketa normalak jarraitzen dituztela kontsideratu da. Lortutako parametro guztiek espero zen zeinua dute, eta gehienak zerotik desberdinak dira %1eko adierazgarritasun-mailarekin. Espero daitekeen moduan, energia gehiago aurrezteak eragin positiboa du erabilgarritasunean. Zenbatetzitako desbideratze estandar esanguratsuak adierazten du datuetan lehentasun-heterogeneotasun nabarmena dagoela. Gobernuak ezar litzakeen laguntza-mekanismoek ere (hau da, diru-laguntza, finantzaketarako interes-tasa eta kenkari fiskala) fatxadak birgaitzeko aukeran efektu bultzatzailea eragiten dute.



Bost atributu horiek etxeko errentarekin interakzioan jarri dira. Azken hau DCEan kategoria diskretuetan eskatu denez, eredian *dummy* aldagai bat definitu da 35.000€-tik beherako diru-sarrerak dituzten etxeak sailkatzeko. Errentaren eragin nabarmena aurkitu da gizabanakoek atributu horiek aintzat hartzeko orduan, eta hori ez dator bat literaturan egindako beste azterketa batzuekin, zeinak zenbatetsi zuten etxeetako diru-sarrerak ez dutela eragin neurgarririk fatxaden isolamendu-jardueran [98] edo, are gehiago, diru-sarrera baxuagoak dituzten biztanleek aukera handiagoa dutela kanpo-isolamendua aplikatzeko [99].

Energia-aurrezkiaren erabilgarritasuna txikiagoa da diru-sarrera txikiko etxeentzako. Finantza-arrazoak direla eta, energia-kontsumo arrunt txikiago bat izan daiteke horren zergatia: Espainian korrelazio handia dago diru-sarreraren mailaren eta etxean neguan tenperatura egokia izateko ezintasunaren artean [100]. Kontsumo arrunt txikiagoa duten etxeek aurrezte potentzial gutxiago eta amortizazio-epe luzeagoak izan ditzakete energia-eraginkortasuneko inbertsioetarako. Halaber, ikusi da diru-sarrera txikiko etxebizitzek erabilgarritasun txikiagoa hautematen dutela diru-laguntza publikoko unitate bakoitzeko; beraz, *caeteris paribus*, diru-laguntza handiagoa beharko lukete fatxadaren isolamendu energetikoa burutzeko. Gainera, inbertsio hori finantzatzeko kredituen mende are gehiago daudenez, diru-sarrera txikiko etxeek balio handiagoa ematen diote balizko finantzaketa bigunari: azken honen erabilgarritasun gehigarri garrantzitsu bat hautematen dute etxebizitza horiek. Aldiz, errenta handiko familiek kenkari fiskala erabilgarriagoa ikusten dute, hau da, fiskalitatea gutxitzeari gehiago erantzuten diotela dirudi.

Bestalde, fatxada-isolamendu alternatiben konstante espezifikoak (ASC) horiekin lotutako eta hautematen ez diren faktoreen batez besteko eragina hartzen du, egungo egoera mantentzearekiko. Faktore horiek onurak izan daitezke, hala nola erosotasun termiko handiagoa, etxe beroago batean bizitzeak osasunari dakartzkion onurak, etxeen balio altuagoa, etab., eta baita espero den energia aurreztearekin lotutako ziurgabetasuna edota obren eragozpenak ere, hala nola zarata, hautsa eta abar. Hasiera batean, ASC desberdin bat esleitu zaio DCEan sartutako fatxada berritzeko aukeretako bakoitzari, frogatzeko aukera-multzoetan agertu diren ordenak ez duela eraginik izan aukeratzeko orduan. Hau egiaztatu ostean, azkenean ASC bera erabili da fatxada berritzeko aukeren erabilgarritasunean. Konstantetzat hartu da, eta lortutako koefiziente positiboak adierazten du erabilgarritasunean sartu ez diren faktore horiek batez beste handitu egiten dutela fatxada berritzeko probabilitatea: guztira, badirudi onurek nabarmen gaintzen dituztela fatxada-isolamenduekin lotutako eragozpenak.

ASC interakzioan jarri da inkestatutakoen zenbait ezaugarriekin, biztanleen azpitalde ezberdinek fatxada berritzeko joera handiagoa edo txikiagoa duten aztertzeke. DCEan, elkarrizketatuen datuak eskatu dira, aurretiko ikerketa empirikoen edo intuizioaren arabera birgaitze energetikoan eragina izan dezaketen alderdiei buruz. Inkestatuen ezaugarri horiek beren t-estatistiko sendoaren arabera sartu dira erabilgarritasun-ereduan, estatistikoki esanguratsuak diren ezaugarriak soilik kontsideratuz.

Elkarrizketatuen adina adierazgarria da eredian. Alde batetik, belaunaldi nagusienek fatxada isolatzeko borondate handiagoa erakutsi dute. Are zehatzago, erretirotik gertu dauden pertsonak (55 eta 65 urte bitartekoak) dira fatxadaren isolamenduan inbertitzeko probabilitate

handiena dutenak. Emaidza horren azalpen onargarri bat diru-aurrezki handiagoarekin lotuta egon daiteke. Gainera, zenbait literaturaren arabera, erretiroaren hasiera une garrantzitsutzat jotzen da etxejabeek energiarekin lotutako esku-hartzeak egiteko [101]; ziurrenik, erretiroa hartzean fatxada berritzeak dakartzan istiluak eta segurtasunarekin eta erosotasunarekin lotutako eragozpenak saihesteko helburuarekin. Arrazoiketa hori emaitzetara egokitzen dela dirudi. Neurri txikiagoan bada ere, erretiratuek ere (65 urtetik goragokoek) joera handiagoa dute fatxadaren birgaitze energetikoa burutzeko, inkestatu gazteenek eta adin ertainekoek baino. Sarritan etxean denbora gehiago ematea dakarren bizimoduak azal dezake erosotasun-baldintza egokiak bermatzeko nahi hori. Bestalde, belaunaldi gazteenen eta adin ertainekoen artean ez dago alde nabarmenik. Azken hau ez dator bat egindako beste ikerketa batekin, gazteenek eraginkortasun energetikoan inbertitzeko joera handiagoa dutela ondorioztatu zuena [102].

Gizabanakoen adinaz gain, etxeko berokuntza-sistemari buruzko informazioa ere sartu da MXL ereduan. Izan ere, gas naturalezkoa edo elektrikoaren ordez “beste” berokuntza-sistema bat duten etxeetan, fatxadaren isolamendu termikoa ez da hain erakargarria. “Beste bat” moduan definituriko berokuntza-sistema horietako gehienak berokuntza-sistema zentralak dira (komunalak), gasolioa kontsumitzen dutenak. Beraz, emaitza hori energia ordaintzeko metodoak azal dezake. Berokuntza-sistema zentralerako bizitegi-eraikinetan, 2012/27/EB Zuzentarauak 2017rako etxebizitza bakoitzean banakako neurketa-gailuak jartzea eskatu bazuen ere, honen transposizioa atzeratu egin zen Espainiako araudian [103]. Ondorioz, etxebizitza askok oraindik ez dute kontsumitzen duten energiaren arabera ordaintzen, komunitatean duten partaidetza-koefizientearen arabera baizik [104]. Beraz, etxejabe batek uste badu bere etorkizuneko energia-kostuak bizilagun guztien portaera termiko orokorrarekin lotuta egoten jarraituko dutela (bere kontroletik kanpo dagoena), baliteke eraginkortasun energetikoko neurri batean inbertitzeko prest ez egotea, haren itzulkina zalantzarriagoa baita.

Gainera, fatxadak isolatzeko joera txikiagoa da berokuntza elektrikoko sistemak dituzten etxeetan, gas naturala kontsumitzen duten etxeetan baino. Hasiera batean, berokuntza elektrikoko sistema duten etxeek pizgarri handiagoa izan dezaketela iragarri da, urteko energia-kostuak handiagoak baitira gas naturaleko berokuntza-sistemekin alderatuta. Hala ere, DCEaren testuingurua bat etorri da 2022aren hasieran izan den gas naturalaren prezioen igoera handiarekin, eta horrek kezka handia sortu du. Gas naturalaren prezioen paradigma-aldaketa horrek azal dezake gas naturalaren kontsumitzaileen joera handiagoa eraginkortasun energetikoa handitzeko.

Beste ikerketa batek zioenaren aurka [105], etxe batean 15 urtetik beherako haurrak egoteak eragin nabarmena duela ikusi da fatxadako birgaitzearen erabilgarritasunean. Hasierako hipotesia egiaztatu da; hots, haurren erosotasunarekiko eta sarritan haurrekin bizitzeak dakarren energia-kontsumo handiagoarekiko kezka dela eta, haurrak dituzten etxeek energia-eraginkortasunerako neurriak hartzeko joera handiagoa dutela.

Egungo berokuntza kontsumo-mailak eragina izan dezake etxe baten eraginkortasun energetikoa hobetzeko jarreran; izan ere, lehendik dagoen kontsumoa jada txikia denean, fatxadako esku-hartze batek eragin dezakeen aurrezki txikiagoa da. Hala ere, DCEak ez du



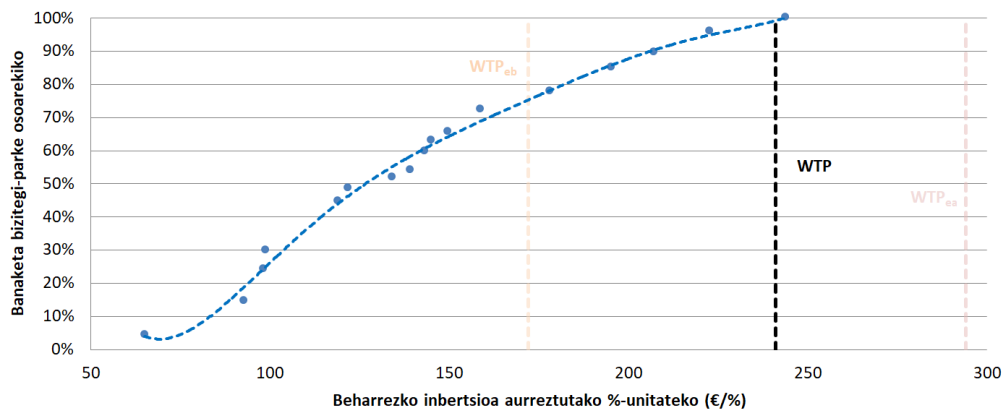
zuzenean eskatu etxeetako energia-kontsumo erreala, elkarrizketatuari galdeketa momentuan bertan erantzutea eragotziko bailioke, eta aurreko energia-fakturak bilatzeko eskatu. Online egindako DCEaren testuinguruan, horrek inkestatuek galdetegia betetzeko gogoia galtzea eragin dezake. Energia-kontsumoaren *proxy* edo ordezkoko gisa, galdetegiak normalean etxeak programatzen duen berokuntzaren kontsigna-tenperatura eskatu du, baina frogatu da honek ez duela eragin adierazgarrikerik erabilgarritasunean.

Muga horrek, inkestatuen zereginaren esfortzua mugatzearekin lotuta, beste datu garrantzitsu batzuk biltzea ere oztopatu du. Datu horiek eragina izan dezakete fatxada berritzean inbertitzeko probabilitatean, hala nola eraikinaren adina edo etxebizitzek duten diru-aurrezkiaren zenbatekoa: inkestatuen kontsulta gehigarriak eskatuko lukete biek. Bestalde, eraikinaren egungo kontserbazio-egoera ere analitiko kanpo utzi da, uste baita elkarrizketatuen erantzunek, deskribapen kualitatiboan gama batetik aukeratuak izan daitezkeenez, subjektibotasun handia izango luketela. Alde horretatik, datuak biltzeko prozesu landuago batek ikerketa berriak egitea ahalbidetuko luke, faktore horiek guztiak barne hartzeko.

Halaber, fatxada-isolamenduaren bidez lortutako berokuntza-energia aurrezkiei etxeek ematen dieten diru-balioa zehazteko, energia-aurrezki horien WTP zenbatetsi da.

Inbertsio-kostuari eta urteko energia aurrezpenari lotutako koefizienteen batez bestekoak eta desbiderapenak erabiliz 17. ekuazioan, WTParen mediana kalkulatu da etxeen hurrengo bi errenta-tarteentzat: 35.000€-tik beherakoa (errenta baxua) eta 35.000€-tik gorakoa (errenta ertaina eta altua). Emaitzek alde handia erakutsi dute: errenta txikiko etxeen WTP (172€ aurreztutako %-unitateko) askoz ere baxuagoa da errenta ertainak eta altuak dituzten etxeen WTP baino (294€). Laginaren etxeetako diru-sarreraren banaketa kontuan izanik, WTP totalaren 241€ko mediana lortzen da aurreztutako %-unitateko.

Kalkulatutako WTPak, energia-aurrezpen horiek lortzeko beharrezkoak diren benetako inbertsio-kostuekin aldera daiteke, metodologiaren bigarren fasean aztertu direnekin hain zuzen ere. Konparaketa horren emaitzek erakusten dute egungo bizitegi-parkean egin beharreko inbertsio-kostuak kalkulaturako WTP totalaren azpitik daudela. 30. Irudian, Bilboko etxebizitzaren banaketa-funtzioa adierazten da, eraikin-arketipo bakoitzaren pisuan oinarritua, fatxadak isolatzeko egin beharreko inbertsioaren arabera. Ikus daiteke etxebizitzaren ia %100k inbertsio kostu txikiagoa behar dutela azterketa honetan lortutako WTPak baino. Proporzio hori %72 ingurura jaisten da 35.000€-tik beheragoko diru-sarrerak dituzten etxebizitzentzat.



**30. Irudia: Bilboko etxebizitzaren banaketa-funtzioa, fatxadak isolatzeko egin beharreko inbertsioaren arabera. WTP totala erakusten du, eta baita errenta baxuko etxeena ( $WTP_{eb}$ ) eta errenta ertain eta handikoena ere ( $WTP_{ea}$ ).**

Emaizten arabera, fatxadaren energia-berritzeari eta neurri horiek dakartzaten onurei buruzko informazio osoa izanez gero, etxe gehienak prest egongo lirateke beren etxebizitzak termikoki isolatzeko. Beraz, ereduak adierazten du gaur egungo laguntza publikoko mekanismoek nahikoa izan behar dutela fatxadaren birgaitze energetikoak eskala handian hartzea sustatzeko, eta azken hau indultzeko modu eraginkor bat kostuei eta onurei buruzko informazio argiagoa ematea izan daitekeela, horiek kuantifikatuz, eraginkortasun energetikoan inbertitzea pentsatzen ari diren etxejabeek.

#### 4.3.2 *Ereduaren aplikazioa Bilboko bizitegi-parkean*

Estimaturako MXL ereduaren aplikagarritasuna Bilboko bizitegi-parkeari aplikatzen zaio, fatxadak isolatzeko inbertsioari buruzko etxejabeen erabakiak simulatzeko eta birgaitze hori egiteko probabilitateak zenbatesteko. Horrela, hirugarren fasean garaturako aukera diskretuko ereduak, lehenengo fasean burututako bizitegi-parkearen karakterizazioarekin konbinatuz, etxeko kategoria bakoitzak eskatzen dituen laguntza-mekanismo espezifikoak identifika daitezke, eta horrek fatxadako isolamendu termikoak modu zabalagoan sustatzeko lagun dezake, aldi berean pizgarrien eraginkortasunaren hobetuz.

Balioetsitako MXL ereduaren aplikagarritasuna frogatzeko, hiru eraikin-arketipoen kasuak aztertu dira (6, 7 eta 14. arketipoenak zehazki), modelaturako hiri-morfologia guztiak barne hartzeko xedearekin hautatu direnak. Horietan 8 cm-ko fatxada-isolamendu termikoa aztertu da, lodiera optimotzat egiaztatu dena. Eraikin-arketipo horien ezaugarri nagusiak 26. Taulan laburtzen dira. Bakoitzari berokuntza-sistema nagusi bat esleitu zaio, INEk emandako banaketaren arabera [50], eta gehien kontzentratzen den hiri-auzoarekin harremandu da. Hortaz:

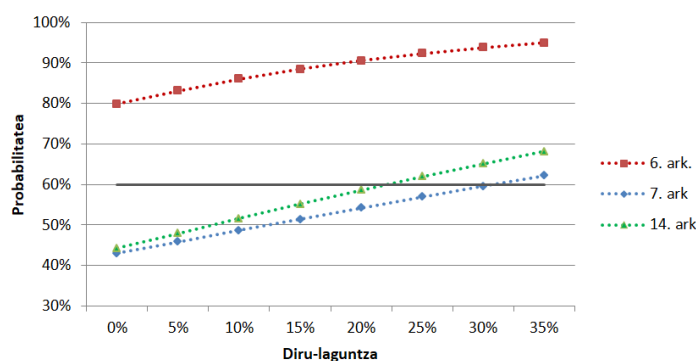
- 6. arketipoa Abando auzoari dagokio, hiriaren erdialdean dagoena. Bere hiri-morfologia XIX. mendeko zabalgunetako bloke solidoa da.
- 7. arketipoa Otxarkoagako auzo periferikoan nagusi den estilo arrazionalistako bloke lineal ohikoa da.
- 14. arketipoa eraikin berezia da, altuera handikoa, Txurdinagako auzoan aurki daitekeena.

Ondorioz, etxe bakoitzari esleitutako diru-sarreraren maila, EUSTATEk emandako auzo horren batez besteko diru-sarrerari dagokio [106]. Etxebizitza bakoitzean adin ertaineko familiaburua onartzen da.

26. Taula: aztertutako eraikin-arketipoen ezaugarri nagusiak.

|                     | 6. ark.           | 7. ark.       | 14. ark.            |
|---------------------|-------------------|---------------|---------------------|
| Hiri-morfologia     | Bloke solidoa     | Bloke lineala | Eraikin berezia     |
| Eraikuntza-aldia    | 1960a baino lehen | 1961–1980     | 1961–1980           |
| Berokuntza sistema  | Gas naturala      | Elektrikoa    | Zentrala (gasoleoa) |
| Inbertsio-kostua    | 5.000€            | 7.000€        | 10.000€             |
| Energia-aurrezkia   | %30               | %37           | %43                 |
| Etxeko diru-sarrera | 82.630€           | 24.406€       | 44,998€             |

Lehenik eta behin, aukera diskretuko eredua erabiliz, eraikin-arketipo bakoitzean fatxada-isolamenduak egiteko probabilitatea kalkulatu da, inolako diru-laguntzarik gabe. Ondoren, simulazio ezberdinak burutu dira, gero eta diru-laguntza handiagoa emanez. 31. Irudian lortutako probabilitateak ikus daitezke.



31. Irudia: birgaitzeko probabilitatearen aldaketa diru-laguntzaren mailaren arabera.

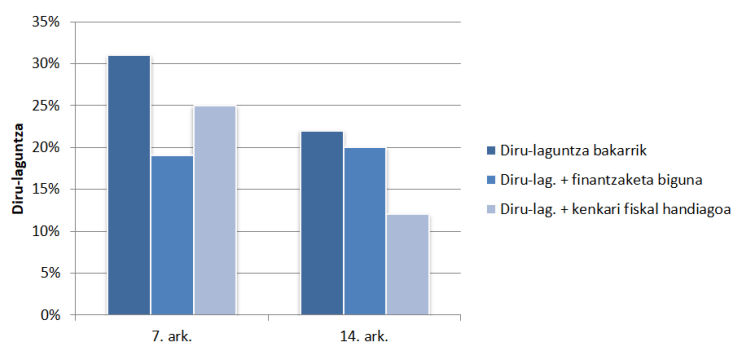
Egiaztatu da fatxadaren birgaitzeko probabilitatea linealki handitzen dela, gutxi gorabehera, diru-laguntzaren mailarekin. %60ko probabilitate-maila hartu da eraikin baten kanpo-isolamendu termikoa benetan gauzatu dela pentsatzeko erreferentzia gisa, hori baita Jabetza Horizontalaren Espainiako Legearen (LPH) 10.3 artikulua eraikin baten jabe-komunitate bati eskatzen dion quoruma, "fatxadako eraginkortasun energetikoa hobetzeko ingurutzaila aldatzea" adosteko.

6. arketipoa atalase horretara iristen da inolako diru-laguntzarik gabe (%80ko probabilitatea erakusten du). Zabalguneko bloke solido trinkoan eraikinek duten fatxada txikiagoa dela eta,

beharrezkoa den inbertsio txikiagoa gailentzen dela dirudi. Inbertsio-kostu/energia-aurrezpen erlaziorik onenaz gain, lortutako MXL ereduak adierazten du gas naturaleko berokuntza-sistemek (eraikin horiek sarritan izaten dituztenak) gehiago estimulatzen dituztela fatxadako energia-berritzeak, beste sistema batzuekin alderatuta. Hauek hirigune askotan aurki ditzakegun baldintzak dira, Bilbokoan kasu. Beraz, *free-riding* potentziala ahalik eta gehien murrizteko, komeni da horrelako egoerak kontuan hartzea pizgarri-politika bat definitzean. Politika-egile baten ikuspegitik, merezi du aipatzea energia aurrezteko ahalmen txikiena duen etxearen kategoria dela fatxada isolatzeko prestasun handiena erakusten duena.

Aldiz, %31ko diru-laguntza maila beharko litzateke 7. arketipoan, fatxadaren isolamendua %60ko probabilitatea izateko; aldiz, 14. arketipoan, %22ko diru-laguntza. Bi zenbatekoak ohiko laguntza-programek emandakoak baino txikiagoak dira [85] [86]. Halaber, 14. arketipoak 6. arketipoak bezalako birgaitzearen aldeko joera du, energia aurrezteko inbertsio-ratioa askoz okerragoa izan arren (€/%). Horrek agerian uzten du kostu-aurrezki azterketa soil batetik haratago joan behar dela, eta beste aldagai batzuk kontuan hartu behar direla politika espezifikokoak diseinatzeko, hala nola errenta edo berokuntza-sistema.

Bestetik, diru-laguntzak interes baxuko maileguekin elkartzearen eraginkortasuna adierazten dute emaitzek. Neurri osagarri horiek zuzeneko diru-laguntzekin lotutako gastu publiko murrizten lagun dezakete. Neurri horiek gehituta, B eta C arketipoek %60ko birgaitze-probabilitatera iristeko beharko lukeen diru-laguntza txikiagoa 32. Irudian ikus daiteke.



32. Irudia: %60ko birgaitze-probabilitatera iristeko beharko lukeen diru-laguntza.

14. arketipoan (errenta ertaineko eta altuko etxebizitzetan) nahiago da zerga-murrizketa handiagoa, finantziario biguna baino, azken honen eragina mugatua izanik. %25eko kenkari fiskala izanez gero (egungo %18aren aldean), behar diren diru-laguntzak erdira murriztuko lirarteke, gutxi gorabehera. Aldiz, 7. arketipoan (diru-sarrera txikiak dituzten etxeetan) interes-tasa txikiko maileguekiko sentikortasuna askoz handiagoa da, kenkari fiskal handiagorekin alderatuta. Finantzaketa bigun eta diru-laguntzen konbinazioari esker, bigarrenen maila optimiza daiteke; 7. arketipoan, zenbatetsitako diru-laguntza %40 inguru murrizten da.

#### 4.3.3 Aldagai esplikatzaileen efektu marjinalak

Deskribatutako kasuak aztertzeo, etxebizitza "tipikoak" hartu dira kontuan. Etxebizitza horiek, bizitegi-eraikin batzuen adierazgarri izan arren, hipotetikoak izaten jarraitzen dute. Beraz, interesgarria da aztertzea aldagai esplikatzaile desberdin batek nola eragiten dien aukera-probabilitateei.



Horretarako, 7. arketipoa hartu da oinarrizko kasutzat, eta atributu bakoitza bata bestearen atzetik da, gainerako aldagai esplikatzaileak berdin mantenduz. Hala, sentikortasunaren analisia egin da, aldagai bakoitzaren aldaketaren efektu isolatua aztertuz. 27. Taulan simulazio horren emaitzak bildu dira.

27. Taula: belioetsitako probabilitate aldaketak, oinarrizko kasuarekiko, atributu-aldaketa bakoitzarentzako.

| Aldaketa   | Birgaitze energetikoaren probabilitate-aldaketa |
|--|---|
| Diru-sarrera handiagoa (35.000 – 70.000€)        | + %15   |
| Etxejabearen adina 55-65 bitartekoa              | + %39   |
| Etxejabearen adina 65etik gorakoa                | + %32   |
| Berokuntza sistema zentrala                      | - %10   |
| Gas naturalezko berokuntza sistema               | + %20   |
| Haurrak etxean                                   | + %23   |
| Inbertsio-kostuak %10 handiagoak                 | - %2  |
| Energia-aurrezkiak %10 handiagoak                | + %2  |
| %10eko diru-laguntza                             | + %6  |
| Finantzaketa biguna (%5-etik %2ra pasatzea)      | + %7  |
| Kenkari fiskal handiagoa (%18tik %25ra pasatzea) | + %3  |

Birgaitze energetikoaren probabilitatea nabarmen handitzen da diru-sarreraren maila altuagoekin. Lortutako probabilitate-mailak iradokitzen du diru-sarrera aldagai jarraitu gisa hartzeak edo, are gehiago, diru-sarrera kategoria diskretu gehiagotan bereizteak eredu finagoa ekar dezakeela. Halaber, 27. Taulan ageri da etxejabeen adinak eragin nabarmena duela fatxada birgaitzeko erabakian. Oinarrizko kasuarekin alderatuta, belaunaldi nagusiagoek birgaitzeko probabilitate nabarmen handiagoa erakusten dute. Berokuntza sistema zentrala edukitzeak fatxadaren birgaitze energetikoaren erabilgarritasuna gutxituko luke; aldiz, haurrak etxean edukitzeak inbertitzeko joera handitzen du.

Azpinarratu beharra dago, birgaitzeko probabilitateak inbertsio-kostu edota energia-aurrezpen handiagoekiko duen sentikortasunak magnitude-orden txikiagoa erakusten duela. Kostuak %10 handituz gero, fatxada berritzeko probabilitatea %2 baino ez litzateke txikituko, balio hori %10 handiagoa den energia aurrezkiarekin lortutako probabilitate-igoeraren antzekoa izanik. Emaitza horiek erakusten dutenez, kostu/etekin ekonomikoaren ebaluaziotik haratago, etxearen zenbait ezaugarri eragin nabarmena izan dezakete energia-berritzeen ezarpenean, eta hori kontuan hartu behar da lehentasun-heterogeneotasuna atzemateko.

Tresna politikoen eragin sustatzaileari dagokionez, ikusi da 7. arketipoaren oinarrizko kasuan, %10eko diru-laguntzarekin lortutako igoeraren probabilitatea interes baxuko maileguekin lortutakoaren baliokidea izango litzatekeela. Halaber, emaitzen arabera, kenkari fiskala handitzea baino hobea litzateke azken hori.

## 5. Erreferentzia iturriak

- [1] IEA, «CO2 emissions from fuel combustion. Highlights,» 2017.
- [2] IPCC, «Global Warming of 1.5 °C. Summary for Policymakers,» 2018.
- [3] European Commission (EC), «A Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy,» 2018.
- [4] Eurostat, «Energy production and imports,» [En línea]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_production\\_and\\_imports#More\\_than\\_half\\_of\\_EU\\_energy\\_needs\\_are\\_covered\\_by\\_imports](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_production_and_imports#More_than_half_of_EU_energy_needs_are_covered_by_imports).
- [5] EIA, «International Energy Outlook,» 2021.
- [6] European Commission (EC), «European Energy Security Strategy. COM(2014) 330 final,» 2014.
- [7] European Commission (EC), «Energy Performance of Buildings Directive,» [En línea]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en).
- [8] T. Häkkinen, «Systematic method for the sustainability analysis of refurbishment concepts of exterior walls,» *Construction and Building Materials*, vol. 37, pp. 783-790, 2012.
- [9] Ministerio de Movilidad, Transportes y Agenda Urbana, «Actualización 2020 de la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España, ERESEE,» 2020.
- [10] G. M. Mauro, M. Hamdy, N. B. Giuseppe Peter Vanoli y J. L. Hensen, «A new methodology for investigating the cost-optimality of energyretrofitting a building category,» *Energy and Buildings*, vol. 107, p. 456–478, 2015.
- [11] Y. Xing, N. Hewitt y P. Griffiths, «Zero carbon buildings refurbishment—A Hierarchical pathway,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3229-3236, 2011.
- [12] European Commission (EC), «A European Green Deal,» [En línea]. Available: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en).
- [13] Official Journal of the European Union, «Directive 2010/31/EU,» 2010.
- [14] Official Journal of the European Union, «Directive 2012/27/EU,» 2012.
- [15] Official Journal of the European Communities, «Directive 2002/91/EC,» 2002.
- [16] Official Journal of the European Union, «Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012,» 2012.
- [17] Official Journal of the European Union, «Guidelines accompanying Commission Delegated

Regulation (EU) No 244/2012,» 2012.

- [18] Boletín Oficial del Estado, «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,» 2013.
- [19] Ministerio de Obras Públicas, «Report on the calculation of the cost-optimal levels of the minimum energy performance requirements for buildings in the new Spanish regulations and their comparison with the current requirements,» 2018.
- [20] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE Ahorro de Energía.»
- [21] Ministerio de Fomento, «Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España,» 2014.
- [22] European Commission (EC), «Clean energy for all Europeans package,» [En línea]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en).
- [23] Official Journal of the European Union, «Directive (EU) 2018/844,» 2018.
- [24] Official Journal of the European Union, «Directive (EU) 2018/2002,» 2018.
- [25] Official Journal of the European Union, «Regulation (EU) 2018/1999,» 2018.
- [26] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Estrategia Descarbonización a Largo Plazo 2050,» 2020.
- [27] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030,» 2020.
- [28] Official Journal of the European Union, «Regulation (EU) 2021/1119,» 2021.
- [29] European Commission (EC), «Renovation wave,» [En línea]. Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave\\_en#:~:text=The%20Renovation%20Wave%20initiative%20builds,and%20climate%20plans%20\(NECPs\)..](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en#:~:text=The%20Renovation%20Wave%20initiative%20builds,and%20climate%20plans%20(NECPs)..)
- [30] European Commission (EC), «Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast), COM(2021) 802 final,» 2021.
- [31] Covenant of Mayors, «Covenant of Mayors for Climate and Energy,» [En línea]. Available: <https://www.covenantofmayors.eu/en/>.
- [32] DesignBuilder Software Ltd, «DesignBuilder simulation tool,» [En línea]. Available: <https://designbuilder.co.uk>.
- [33] MathWorks, «MATLAB,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.

- [34] NREL, «System Advisor Model (SAM) software,» [En línea]. Available: <https://sam.nrel.gov>.
- [35] The R Foundation, «The R Project for Statistical Computing,» [En línea]. Available: <https://www.r-project.org/>.
- [36] L. G. Swan y V. I. Ugursal, «Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 1819-1835, 2009.
- [37] M.Kavgic, A.Mavrogianni, D.Mumovic, A.Summerfield, Z.Stevanovic y M. Djurovic-Petrovic, «A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector,» *Building and Environment*, vol. 45, pp. 1683-1697, 2010.
- [38] A. Mastrucci, O. Baume, F. Stazi y U. Leopold, «Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city: A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam,» *Energy and Buildings*, vol. 75, pp. 358-367, 2014.
- [39] R. McKenna, E. Merkel, D. Fehrenbach, S. Mehne y W. Fichtner, «Energy efficiency in the German residential sector: A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets,» *Building and Environment*, vol. 62, pp. 77-88, 2013.
- [40] Aalborg Universitet, «Cost optimal levels for energy performance requirements,» 2011.
- [41] European Council for an Energy Efficient Economy, «Cost optimal building performance requirements. Calculation methodology for reporting on national energy performance requirements on the basis of cost optimality within the framework of the EPBD,» 2011.
- [42] P. Zangheri, R. Armani, M. Pietrobon y L. Pagliano, «Identification of cost-optimal and NZEB refurbishment levels for representative climates and building typologies across Europe,» *Energy Efficiency*, vol. 11, p. 337-369, 2018.
- [43] Buildings Performance Institute Europe (BPIE), «Cost Optimality. Discussing methodology and challenges within the recast Energy Performance of Buildings Directive,» 2011.
- [44] UNE, «UNE-EN 15459-1:2018: Eficiencia energética de los edificios. Procedimiento de evaluación económica de los sistemas energéticos de los edificios,» 2018.
- [45] T. Domencich y D. L. McFadden, *Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis*, North-Holland Publishing Co., 1975.
- [46] K. E. Train, *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press, 2009.
- [47] ChoiceMetrics, «Ngene 1.2 User Manual & Reference Guide,» 2018.
- [48] P. Mariel, D. Hoyos, J. Meyerhoff, M. Czajkowski, T. Dekker, K. Glenk, J. B. Jacobsen, U. Liebe, S. B. Olsen, J. Sagebiel y M. Thiene, *Environmental Valuation with Discrete Choice Experiments*, Springer, 2021.
- [49] R. Winkelmann y S. Boes, *Analysis of Microdata*, Springer, 2006.

- [50] INE, «Censos de Población y Viviendas 2011,» [En línea]. Available: <https://www.ine.es/censos2011/tablas/Inicio.do>.
- [51] European Commission (EC), «E-retrofit Kit Project,» [En línea]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/e-retrofit-kit>.
- [52] Instituto Cerdá, «Proyecto RehEnergía. Rehabilitación energética de edificios de viviendas. Jornada Rehabilitación Energética,» 2008.
- [53] WWF España, «Potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO2 del parque residencial existente en España en 2020,» 2010.
- [54] IDAE, «Escala de calificación energética. Edificios existentes,» 2011.
- [55] I. Lizundia, La Construcción de la Arquitectura Residencial en Gipuzkoa durante la Época del Desarrollismo, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), 2012.
- [56] Dirección de Vivienda, Departamento de Empleo y Políticas Sociales del Gobierno Vasco, «Catálogo de Rehabilitación Energética,» 2014.
- [57] BOE, «Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas,» 2013.
- [58] Boletín Oficial del Estado, «Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana,» 2015.
- [59] H. Sanaieian, MartinTenpierik, K. v. denLinden, F. M. Seraj y S. M. M. Shemrani, «Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 551-560, 2014.
- [60] AEMET, «Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT.,» 2012.
- [61] Boletín Oficial del Estado, «Real Decreto 2429/79, de 6 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, sobre Condiciones Térmicas en los edificios,» 1979.
- [62] IDAE, «Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España,» 2011.
- [63] Eusko Jaurlaritz. Ekonomiaren Garapen, Jasangarritasun eta Ingurumen Saila, «Eraginkortasun energetikoaren ziurtagiria,» [En línea]. Available: <https://www.euskadi.eus/certificado-eficiencia-energetica/web01-a2indust/es/>.
- [64] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, «Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España,» 2014.
- [65] IDAE, «Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER,» 2009.

- [66] EEE-EVE, «Claves energéticas del sector doméstico en Euskadi,» 2013.
- [67] IDAE, «SPAHOUSEC II: Análisis estadístico del consumo de gas natural en las viviendas principales con calefacción individual,» 2019.
- [68] D. George, N. S.Pearre y L. G.Swan, «High resolution measured domestic hot water consumption of Canadian homes, *Energy and Buildings*,» *Energy and Buildings*, vol. 109, pp. 304-315, 2015.
- [69] A. S. Vieira, C. D. Beal y R. A.Stewart, «Residential water heaters in Brisbane, Australia: Thinking beyond technology selection to enhance energy efficiency and level of service,» *Energy and Buildings*, vol. 82, pp. 222-236, 2014.
- [70] Department for Environment, Food and Rural Affairs, «Measurement of Domestic Hot Water Consumption in Dwellings,» 2008.
- [71] A. Bertrand, AlessioMastrucci, N. Schüler, R. Aggoune y F. Maréchal, «Characterisation of domestic hot water end-uses for integrated urban thermal energy assessment and optimization,» *Applied Energy*, vol. 186, pp. 152-166, 2017.
- [72] J. C. Evarts y L. G. Swan, «Domestic hot water consumption estimates for solar thermal system sizing,» *Energy and Buildings*, vol. 58, pp. 58-65, 2013.
- [73] Passive House Institute, «Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard,» 2016.
- [74] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, «CTE. Catálogo informático de elementos constructivos (CEC),» 2011.
- [75] A. J. Tiberio y P. E. Branchi, «Análisis de la estanqueidad al aire en la construcción y rehabilitación energética de edificios de viviendas,» *CSCAE Anexo*, vol. 17, p. 12, 2015.
- [76] A. Meiss, J. Feijo-Muñoz y M. Padilla-Marcos, «Evaluación, diseño y propuestas de sistemas de ventilación en la rehabilitación de edificios residenciales españoles. Estudio de caso,» *Informes de la Construcción*, vol. 68, nº 542, 2016.
- [77] E. Barreira, R. M. Almeida y M. Moreira, «An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings,» *Energy and Buildings*, vol. 140, pp. 224-235, 2017.
- [78] C. Rodriguez-Jimenez, M. Carretero-Ayuso y J. Claro-Ponce, «Influencia de las infiltraciones en la rehabilitación energética de la envolvente. El caso del plan de actuaciones en el parque público residencial de Andalucía,» *Informes de la Construcción*, vol. 70, nº 551, 2018.
- [79] S. Klein, W. Beckman y J. Duffie, «A design procedure for solar heating systems,» *Solar Energy*, vol. 18, pp. 113-127, 1976.
- [80] N. Diorio, C. Christensen, J. Burch y A. Dobos, «Technical Manual for the SAM Solar Water Heating Model,» 2014.

- [81] NREL, «SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update,» 2018.
- [82] CYPE Ingenieros, «Generador de precios de la construcción,» [En línea]. Available: <http://www.generadordeprecios.info>.
- [83] Eusko Jaurlaritzza, «Base de Precios de Edificación y Urbanización,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.euskadieuprecios.com>.
- [84] IDAE, «Programa PAREER-CRECE,» [En línea]. Available: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-rehabilitacion-de-edificios-programa-pareer/programa-de-ayudas-para-la>.
- [85] EEE-EVE, «Programa de ayudas para actuaciones de rehabilitación energética en edificios existentes en Euskadi. Programa PREE,» [En línea]. Available: <https://www.eve.eus/Programa-de-ayudas/2020/Rehabilitacion-energetica-en-edificios-existentes?lang=es-es>.
- [86] BOPV, «ORDEN de 21 de julio de 2021, del Consejero de Planificación Territorial, Vivienda y Transportes, sobre medidas financieras para actuaciones protegibles en materia de rehabilitación en viviendas y edificios, accesibilidad y eficiencia energética,» 2021.
- [87] Kutxabank, «Préstamo verde,» [En línea]. Available: <https://portal.kutxabank.es/cs/Satellite/kb/es/particulares/productos/prestamos-consumo/prestamo-coche-verde/pys>.
- [88] BBVA, «Préstamo Eficiencia Energética,» [En línea]. Available: <https://www.bbva.es/finanzas-vistazo/ef/prestamos/asi-es-el-nuevo-prestamo-eficiencia-energetica-bbva.html>.
- [89] CincoDías, «Santander se lanza a por los créditos verdes para la rehabilitación de viviendas,» [En línea]. Available: [https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/08/07/companias/1628335523\\_801440.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/08/07/companias/1628335523_801440.html).
- [90] ICO, «Empresas y Emprendedores,» [En línea]. Available: <https://www.ico.es/web/guest/ico-empresas-y-emprendedores>.
- [91] BOB, «Norma Foral 13/2013 de 5 de diciembre, del Impuesto sobre la Renta de las Personas Físicas,» 2013.
- [92] S. Cozza., J. Chambers y M. Patel, «Measuring the thermal energy performance gap of labelled residential buildings in Switzerland,» *Energy Policy*, vol. 137, p. 111085, 2019.
- [93] C. BALARAS, E. DASCALAKI, K. DROUTSA y S. KONTOYIANNIDIS, «Empirical assessment of calculated and actual heating energy use in Hellenic residential buildings,» *Applied Energy*, vol. 164, p. 115–132, 2016.
- [94] CNMC, «Informe de supervisión del mercado minorista de electricidad. Año 2018,» 2019.
- [95] INE, «Cuentas Trimestrales no Financieras de los Sectores Institucionales. Cuarto trimestre de 2020,» 2021.

- [96] D. McFadden, *Behavioural Travel Modelling*, David A. Hensher and Peter R. Stopher, 1979.
- [97] M. Achtnicht y R. Madlener, «Factors influencing German house owners' preferences on energy retrofits,» *Energy Policy*, vol. 68, pp. 254-263, 2014.
- [98] J. Friege, «Increasing homeowners' insulation activity in Germany: An empirically grounded agent-based model analysis,» *Energy and Buildings*, vol. 128, pp. 756-771, 2016.
- [99] O.Kaya, A.M.Klepacka y W. Florkowski, «The role of personal and environmental factors in rural homeowners decision to insulate; an example from Poland,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 150, p. 111474, 2021.
- [100] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética 2019-2024».
- [101] M. I. Abreu, R. A. d. Oliveira y J. Lopes, «Younger vs. older homeowners in building energy-related renovations: Learning from the Portuguese case,» *Energy Reports*, vol. 6, pp. 159-164, 2020.
- [102] G. Nair, L. Gustavsson y K. Mahapatra, «Factors influencing energy efficiency investments in existing Swedish residential buildings,» *Energy Policy*, vol. 38, pp. 2956-2963, 2010.
- [103] BOE, «Real Decreto 736/2020, de 4 de agosto, por el que se regula la contabilización de consumos individuales en instalaciones térmicas de edificios,» 2020.
- [104] El Correo, «57.500 hogares vizcaínos con calefacción central deben instalar contadores individuales,» [En línea]. Available: <https://www.elcorreo.com/bizkaia/57500-hogares-vizcainos-20211224213807-nt.html#:~:text=Son%20los%20efectos%20colaterales%20de,para%20la%20primavera%20de%202023..>
- [105] J. Dolšak, N. Hrovatin y J. Zorić, «Factors impacting energy-efficient retrofits in the residential sector: The effectiveness of the Slovenian subsidy program,» *Energy and Buildings*, vol. 229, p. 110501, 2020.
- [106] Eustat, «Errenta pertsonala eta familiarra,» [En línea]. Available: [https://www.eustat.eus/estadisticas/tema\\_395/opt\\_0/tipo\\_1/ti\\_renta-personal-y-familiar/temas.html](https://www.eustat.eus/estadisticas/tema_395/opt_0/tipo_1/ti_renta-personal-y-familiar/temas.html).
- [107] T. Hong, Y. Chen, X. Luo, N. Luo y S. H. Lee, «Ten questions on urban building energy modelling,» *Building and Environment*, vol. 168, p. 106508, 2020.
- [108] Y. Chen, T. Hong, X. Luo y B. Hooper, «Development of city buildings dataset for urban building energy modelling,» *Energy and Buildings*, vol. 183, pp. 252-265, 2019.
- [109] D. Majcen, L. Itard y H. Visscher, «Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications,» *Energy Policy*, vol. 54, pp. 125-136, 2013.



- [110] B. Hårsman, Z. Daghbashyan y P. Chaudhary, «On the quality and impact of residential energy performance certificates,» *Energy and Buildings*, vol. 133, pp. 711-723, 2016.
- [111] S. Kelly, D. Crawford-Brown y M. G. Pollitt, «Building performance evaluation and certification in the UK: is SAP fit for purpose?,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 6861-6878, 2012.
- [112] C. Nägeli, M. Jakob, G. Catenazzi y Y. Ostermeyer, «Towards agent-based building stock modelling: Bottom-up modelling of long-term stock dynamics affecting the energy and climate impact of building stocks,» *Energy and Buildings*, vol. 211, p. 109763, 2020.
- [113] INE, «Censo de Población y Viviendas 2001,» [En línea]. Available: <https://www.ine.es/censo/es/inicio.jsp>.
- [114] N. Basurto, Los maestros de obras en la construcción de la ciudad. Bilbao 1876-1910, Bizkaiko Foru Aldundia, 1999.
- [115] Eraikal, «Guía de la rehabilitación energética integral de la envolvente de los edificios en Euskadi. Manual de buenas prácticas en la rehabilitación energética integral de los edificios,» 2015.
- [116] Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco, UPV/EHU, «Catálogo de Rehabilitación Energética,» 2014.
- [117] E. J. Uranga, La intervención energética en el patrimonio edificado residencial. Análisis del Barrio de Gros de Donostia/San Sebastián, UPV-EHU, 2017.
- [118] Eusko Jaurlaritz. Lurralde Plangintza, Etxebizitza eta Garraio Saila, «EuskoRegite. Ikuskaritza Teknikoari buruzko informazio eta kudeaketarako ataria,» [En línea]. Available: <https://www.euskadi.eus/web01-a1ite/es/>.
- [119] A. López de Guereña, N. Rubio, F. García, A. Mora, I. Pérez, E. de la Fuente, F. Romero y A. de Lorenzo, «Guía Metodológica para la Inspección Técnica de Edificios,» 2013.
- [120] F. J. Muñoz, «La arquitectura racionalista en Bilbao (1927-1950). Tradición y modernidad en la época de la máquina,» UPV/EHU, 2011.
- [121] A. Santas, Urbanismo y Vivienda en Bilbao. Veinte años de posguerra, COAVN, 2005.
- [122] J. Martínez, Bilbao. Desarrollos Urbanos. Ciudad y Forma 1960-2000, Gobierno Vasco, 2010.
- [123] Bilboko Udala, «GeoBilbao,» [En línea]. Available: <https://www.geobilbao.eus/geobilbao/>.
- [124] Eustat, «Ingurumenaren Inkesta - Familiak,» [En línea]. Available: [https://eu.eustat.eus/estadisticas/tema\\_217/opt\\_1/tipo\\_1/ti\\_ingurumenaren-inkesta---famiak/temas.html](https://eu.eustat.eus/estadisticas/tema_217/opt_1/tipo_1/ti_ingurumenaren-inkesta---famiak/temas.html).
- [125] INE, «Encuesta de Hogares y Medio Ambiente,» [En línea]. Available: [https://www.ine.es/ss/Satellite?L=es\\_ES&c=INECifrasINE\\_C&cid=1259925028717&p=1254735116567&pagename=ProductosYServicios%2FPYSLayout](https://www.ine.es/ss/Satellite?L=es_ES&c=INECifrasINE_C&cid=1259925028717&p=1254735116567&pagename=ProductosYServicios%2FPYSLayout).



- [126] Orkestra, «Energías renovables en calefacción y refrigeración en los sectores residencial y terciario,» 2017.
- [127] IHOBE, «Ingurumena Euskal Autonomia Erkidegoan: ingurumen-adierazleak,» 2003.
- [128] Bilboko Udala, «Indicadores de Sostenibilidad de Bilbao,» 2008.

## Bigarren Atala: ikerketaren ondorioak

### 6. Ondorioak eta etorkizunerako ikerketa-lerroak

#### 6.1 Ondorioak

##### 6.1.1 Lehenengo fasearen ondorioak

Egungo bizitegi-parkeen karakterizazio energetiko egokia lagungarria izan daiteke behar diren energia-eraginkortasuneko politikak ahalik eta modurik eraginkorrean aplikatzeko. Informazio geografikoko sistemak berriki hobetu direnez, hiri-parkeentzat garatutako ereduak hobetu dira. Hala ere, behar dituzten datuak ez daude beti eskuragarri, eta gainera eredu batzuen sofistikazioa desabantaila bihur liteke horiek erreplikatzeko orduan.

Era berean, tokiko agintariek laguntza handia izan dezakete energia aurrezteko politikak ezartzeko. Eredu horretan laguntzeko asmoz, tesi honek hiri-mailako bizitegi berokuntza-kontsumoa karakterizatzeko metodologia bat aurkezten du. Arreta berezia jarri zaio aplikagarritasunari eta, beraz, metodologia eskura dauden datu publikoen iturrietan oinarritzen da. Hortaz, edozein hiriri aplika dakiok.

Aurkezten den metodologia behetik gorako ingeniari-tza metodoetan oinarritzen da, zeintzuek hainbat erronka dituzten. Sarrera-informazio ugari eskatzen dute ereduak eraikitze eta baliozkotzeko prozesuetarako. Datuen eskuragarritasunarekin lotutako zailtasunei aurre egiteko, proposatutako metodologiak informazioa batzeko modu originalak proposatzen ditu, hala nola erregai-kontsumoaren inkesta burutzeko modua. Horrelako metodoen beste ahultasun bat giza portaeraren zorizko izaera adierazteko zailtasuna da, eta horrek benetako energia-kontsumoaren eta ereduaren emaitzen arteko diferentzia handiak eragin ditzake. Garatutako metodologian, kalibraketa-prozedura enpiriko bat proposatzen da, berokuntzako sistema zentralak dituzten eraikinen kontsumo errealeko datuetan oinarrituta, bizilagunen portaera-profilak eraikitze.

Ikerlariaren esperientzian oinarritutako sarrera-datuekiko gardentasunik ezak, eta sarrera-datu batzuetarako balio estandarrak erabiltzeak, askotan, ereduaren emaitzak sinesgarritasunik gabe uzten dituzte, balioztatze zorrotza egiten ez bada. Deskribatutako metodologian arreta berezia jartzen zaio ereduaren emaitzak egiaztatze prozesuari, datu errealek bilduz, datu errealetan oinarritutako balioztatzea burutzeko. Erabilitako baliozkotze-metodoek, maila desagregatuan zein agregatuan, emaitzen fidagarritasuna bermatzen dute. Erregresio lineal anizkoitzaren metodoaren egokitzapena proposatzen da ere, eskualde-eskala batean aplikatuta, posta-kodearen ohiko mailaren ordez. Halaber, sentikortasunaren analisiak kontsiderazio subjektiboen eragina mugatzen laguntzen du.

Proposaturiko metodologia Bilboko bizitegi-parkean inplementatu da, non 17 eraikin-arketipo identifikatu diren. Eraikitako eraikin-ereduen emaitzak modu esanguratsuan lerrokatzen dira bildutako kontsumo errealeko informazioarekin: maila agregatuan, %4 baino ez da aldentzen datu historikoetatik.

Eraikinen energia-eskaeraren modelizazio zehatza funtsezko tresna da birgaitze energetikoko politikei laguntzeko. Lehenengo faseko azterketa honek Bilboko energia-kontsumoaren

oinarrizko zenbatespena ematen du, eraikin motaren arabera banakatuta. Hau, energia-eraginkortasuneko estrategien ondorio ekonomikoak aztertze oinarria da. Karakterizazio honetan oinarrituta, bigarren fasean eraikin-motaren arabera neurri-multzoko optimoak identifikatu eta energia-helburu desberdinak lortzeko egin beharreko inbertsioak balioetsi dira.

Eraikinen-arketipo bidezko modelizazioan, erronketako bat funtsezko eraikin-parametro kopuru mugatu bat aurkitzea da, parkearen segmentazio-irizpidetzat erabiltzeko, arrazoizko denbora konputazionala bermatzen den bitartean. Emaitzetan ikus daitekeenez, eraikinen arteko energia-kontsumoaren aldaketa askoz handiagoa izan daiteke hiri-morfologia ezberdinetan kokatzeagatik, eraikitze-aldiak zehaztutako fatxada-soluzio desberdinetatik baino. Hiri-formek eragin nabarmena dute eraikin baten energia-jardueran. Horregatik, funtsezkoa da segmentazio-irizpideen barruan hiri-morfologia desberdinekin zeharka erlaziona daitezkeen parametroak sartzea, hala nola eraikinaren altuera eta etxebizitzaren azalera. Harreman horien iturria hiri-bilakaera historikoan eta estilo arkitektoniko desberdinen garapenean bilatu beharra dago.

Aurkeztutako metodologiaren aplikazioa eskuragarri dauden datu-iturriekin guztiz bideragarria frogatu den arren, muga batzuk daude, datu-base nahikorik ez izatearekin lotuta, hura ezartzea zailtzen dutenak. Bibliografian hainbatetan aipatzen den bezala [105] [106], badago aukera eraikin-parkeei buruzko datu-baseen garapena hobetzeko, eta baita bizitegi energia kontsumoaren ezaugarriak hobeto ezagutzeko ere. Halaber, EITek eraikinen modelizazio energetikorako datu-iturri garrantzitsu bihurtzeko gaitasun handia dute. EEZen aplikagarritasuna ere eraikinen energia-modelizazioaren emaitzak baliozkotzeko modu gehigarri gisa ebaluatu da. Hala ere, badirudi EEZe buruzko egungo praktikak berokuntza-energiaren eskariaren gainestimazioa eragiten duela, eta hori bat dator beste azterketa batzuen emaitzekin [107] [108] [109].

Laburbilduz, emaitzek erakutsi dute bideragarria dela hiri-mailako eraikin-parke baten energia termikoaren kontsumoa karakterizatzea eskura dauden datu-iturriekin, energia aurrezteko aukera ezberdinak eta horiekin lotutako CO<sub>2</sub>-aren emisio-murrizketak ikertzeko oinarri gisa.

### 6.1.2 *Bigarren fasearen ondorioak*

EENen ebaluazio ekonomikoak eraikin edo eraikin-mota bakar batean oinarritzen dira maiz, eta ezin dira estrapolatu eraikin-parke oso batera. Beste kasu batzuetan, eraikin-parke handi bat adierazteko definitzen den EEn kopuru mugatuak zaildu egiten du eraikinen tipologia-heterogeneotasun handia atzematea, ebaluazioaren emaitzak modu fidagarrian estrapolatu ahal izateko. Tesi honek kostu-maila optimoaren metodologia hiri-mailan aplikatzea proposatzen du, Bilboko etxebizitza-parkearen kostu-maila optimoak aztertuz hainbat agertokitan. Definitutako EEn kopuru zabalak bizitegi-parkearen karakterizazio zehatza bermatzen du eta, horri esker, zentzuz sustatu beharreko energia-jarduera tarte egokia identifika daiteke, hainbat eraikin motarentzat.

Azterketan ingurutzaila hobetzeko, sistema aktiboa egokitzeko eta energia berriztagarriak erabiltzeko EEN probatuak sartu dira. Fatxaden kanpo-isolamendu optimoa 8 cm ingurukoa dela ikusi da. Oro har, badirudi sistema termiko elektrikoak dituzten eraikinen kostu-maila optimoak fatxadako kanpo-isolamenduaren eta eguzki-kolektore termikoen konbinazio batez



osatuta daudela. Bestalde, GN kontsumitzen duten eraikinetarako kostu-maila optimoak heterogeneoagoak dira: kasu batzuetan, eraikinaren fatxadako kanpo-isolamenduaz baino ez daude osatuta; beste batzuetan, berriz, isolamendu horren eta eguzki-kolektore termikoen edo sistema fotovoltaikoen arteko konbinazioak dira. Azken horiek antzeko emaitza erakusten dute definitutako erreferentzia-agertokian, baina sistema fotovoltaikoaren ustiapena optimizatzen den heinean, sistema horrek eguzki-kolektore termikoekin alderatuz izango lituzkeen onurak handitu egingo lirateke.

Analisiaren emaitzek  $59,01 \text{ kWh/m}^2$  eta  $50,34 \text{ kWh/m}^2$ -ko kostu-maila optimoak ematen dituzte ikuspegi pribatuan eta makroekonomikoan, hurrenez hurren; haiek, erabilera termikoen egungo EP-eb kontsumoaren erdiaren inguru dira ( $116,10 \text{ kWh/m}^2$ ). Hala ere, emaitzen arabera, maila optimoaren EP-eb kontsumoa nabarmen aldatzen da EEen artean, ezaugarri geometriko desberdinak, eraikinaren jarraitutasun-maila eta erabilera termikoetarako erabiltzen den erregaia direla eta. Honek erakusten du lehendik dauden eraikin-parkeen kostu-maila optimoak zehazteko orduan, haiek hurbiletik aztertu behar direla, maila horiek energia-eraginkortasunaren politika eta horri lotutako tresna ekonomikoak gidatu baititzakete. Are gehiago, kontuan izanda Espainia bezalako herrialde deszentralizatueta, azken horiek neurri handi batean eskualdeetako agintariek ezarri ohi dituztela.

Izan ere, ikuspegi pribatu eta makroekonomikoen kostu-maila optimoen arteko diferentziak, erreferentzia-agertokian NG erabiltzen duten EEtara mugatzen dena eta energiaren prezio altuen agertokian berokuntza sistema elektrikoa duten EEtara zabaltzen dena, adierazten du laguntza publikoa beharrezkoa izan daitekeela inbertitzaile pribatuaren eta gizartearen interesak lerrokatzeko.

Halaber, diru-laguntza funtsezkoa da amortizazio-epe pribatuak murrizteko, 21 urtetik gorakoak direnak kostu-maila optimoentzat, eta, horrela, birgaitze energetikoak erabiltzaileentzat erakargarriak izatea lortzeko. GN erabiltzen duten EE gehienetan, aldaera optimoen KGa oinarritako kasuetako KGren oso antzekoa da (edo zertxobait handiagoa ere bai), eta horrek iradokitzen du Bilboko klima epelaren, inbertsioei aurre egiteko behar diren finantza kostuaren eta GNren prezio baxuen konbinazioak eraginkortasun energetikoan jardutearen onura ekonomikoa muga dezakela.

Hala ere, eraikin bat fatxadaren mantentze-lan baten beharrean dagoenean, energia-eraginkortasunean esku hartzeko erakargarritasuna nabarmen handitzen da. Lortuko litzatekeen KG aurrezpenak, eraikinaren jarduera energetikoa hobetzeko aukera paregabea bihurtzen du hori. Kasu askotan arrazoizko amortizazio-epe bat bermatzeko laguntza publikorik behar izan gabe ere. Horrek agerian uzten du energia-eraginkortasunerako neurri bideragarriari buruzko informazio egokia bermatzea funtsezkoa dela aukera horretaz baliatzeko.

Bestela, diru-laguntza publikoen ohiko tarteez maila optimoen amortizazio-epeak 15 bat urtera baino ezin ditzakete murriztu. GN erabiltzen duten eraikinen kasuan amortizazio-epe hori altuagoa izango da, nahitaez. Halaber, kuantitatiboki egiaztatu da mailegu bigunek funtsezko zeregina dutela zuzeneko diru-laguntzen beharra murrizteko.

Lortutako aldaera optimoek EP-eb aurrezteko ahalmen handia duten arren, %48,4koa egungo kontsumoarekin alderatuta, hau oraindik ere urrun dago 2050erako Europako helburuetatik. NZEB eraikinak sustatzeko nazioarteko deialdien testuinguruan, funtsezko gaia planteatzen da:

errendimendu ekonomikoa maximizatzeak CO<sub>2</sub> emisioak murrizteko helburu nagusia lortzeko irismen nahikoa zabala ote duen; beste modu batera esanda, ikuspegi ekonomikoak bigarren maila batera eraman ote lezakeen ingurumenaren ikuspegia. Hala ere, kostu-maila optimoaren metodologia tresna bat da, eraikinen birgaitze energetikoa anbizio handiagoko ingurumen-helburuetara bideratzeko hobetu behar diren esparru-baldintzak identifikatzeko.

Alde horretatik, frogatu da energia-iturri berriztagarrien eginkizuna funtsezkoa dela NZEB mailak lortzeko: erabiltzen ez diren bitartean, zaharberitutako eraikinen jarduera energetikoa, kasu guztietan, NZEB mailatik urrun dago. Bestalde, emaitzek iradokitzen dute EEN pasiboen eta aktibo probatuen konbinazioa, teknologia berriztagarriekin batera, nahikoa dela dauden eraikinen NZEB bihurtzeko. Zentzu honetan, autokontsumoari buruzko Espainiako araudi berria aurrerapauso garrantzitsua da, baina administrazio-prozesua sinplifikatu egin beharko litzateke bizitegi eraikinen komunitateak figura juridiko berrietara atxikitzea bultzatzeko.

Hala ere, epe luzeko ingurumen-helburuak betetzeko sustatu behar den erregai egokienari dagokionez, paradoxa bat existitzen dela aipatu beharra dago. Azterketaren emaitzek erakusten dutenez, elektrizitate-kontsumoaren bidez azken erabilera termikoak asetzen dituzten eraikinek sistema termikoa GNra aldatuz baino ezingo lukete lortu NZEB maila. Hala ere, aurreikusitako sare elektrikoaren deskarbonizazioak elektrizitatea erregai hobegarri bihurtu lezake, prezioen etorkizuneko bilakaera gorabehera.

Bestalde, azken urtean pairatutako neurrigabeko energia prezioei dagokionez, aipatu beharra dago salbuespeneko egoera geopolitiko baten ondorio direla. Egoera horren bilakaeraren eta EBak hartutako energia arloko azken erabakien arabera, oraindik ikusteke dago epe luzeko eboluzioa. Nolanahi ere, energia prezio altuagoko egoera batek birgaitze energetikoak ekonomikoki erakargarriagoak bihurtuko lituzke.

Laburbilduz, azterketa honek epe luzerako politika egokiena definitzen lagundu dezake, inbertsioak mobilizatzea eskatzen duten lehentasuneko eremuak zehaztuz. Halaber, emaitzek energia-eraginkortasuneko politika bat formulatzeko informazioa eman dezakete, birgaitze energetikoko inbertsio pribatuak sustatu ditzaketen pizgarri ekonomikoen eragina ebaluatuz.

Hala ere, metodologia hau ikuspegi pribatu batetik aplikatzeak azken erabiltzailearen batezbesteko tipiko bat zehaztera behartzen du. Batetik, honek bizilagunen arteko desberdintasun sozioekonomiko nabarmenak ezkuta ditzake. Bestetik, birgaitze energetikoak dakartzan onura ugariak modu desberdinean balora ditzake okupatzaile bakoitzak; beraz, birgaitze hori aurrera eramateko prestasuna asko alda liteke kasu batetik bestera. Horrela, azterketa hau osatzeko, hirugarren fasean prestasun hori aztertu da, aukera diskretuko eredu bat garatuz.

### **6.1.3 Hirugarren fasearen ondorioak**

Berokuntzako energia-kontsumoa murrizteko eraikinetako inguratzailearen isolamendua handitzea aukera tekniko probatua den arren, eta etxejabeak hori egitera bultzatzeko finantza-pizgarriak egon arren, eraikinen birgaitze energetikoa ez da gaur egun praktika zabaldua. Bien bitartean, epe luzeko deskarbonizazio-helburuek egungo etxebizitza-parkea berritzen ari den erritmoa handitzea eskatzen dute. Testuinguru honetan, ikerketa-ikuspegi berriak garatzen ari dira, etxejabeek energia-kontsumoari buruzko erabakiak hartzeko prozesuak hobeto ulertzeko.

Ilido berean, tesi honek DCE bat burutu du Bizkaian, etxeek fatxadak termikoki isolatzeko duten prestasuna eta azken hau baldintzatzen duten faktoreak ebaluatzeko. Espainian aukera diskretuko eredu en aplikazioa oraindik ere mugatua da arlo espezifiko honetan, eta tesi honek hutsune hori bete nahi du hein batean.

Emaitzen arabera, etxejabeek interes izugarri handia dute haien etxeen isolamendu termikoa egiteko. Erantzundako aukera-multzoen %14ean bakarrik aukeratu da egungo egoera mantentzea. Emaitzen arabera, Bilbon, eraikinen fatxadak termikoki isolatzeko beharrezkoa den inbertsio-kostua txikiagoa da azterketa honetan lortutako WTP baino. Beraz, badirudi isolamendu termikoa hobetzeak dakartzan onurak oso ondo baloratzen dituztela etxeek, galdetegiaren hasieran deskribatu zirenak. Horrek agerian uzten du informazioa modu egokian emateak eta birgaitzearen nondik norakoak argitzeak, funtsezko zeregina izan dezakeela bizitegi-eraikinen birgaitze energetikoa sustatzeko.

Fatxadak birgaitzeko prestasun handi horren azalpen bat DCEaren testuinguruan aurki daiteke. Batetik, Espainiako etxeek aurrezpen tasaren maximo historikoa lortu zuten COVID-19ko krisialdian zehar, COVID-19 krisian zehar gutxiago kontsumitu zutelako. Aldi berean, Europak aurre egindako energiaren prezio altuen inguruko kezka maximoa izan da 2022ko lehen hiruhilekoan. Horrek guztiak esan nahi du egungo egoerak, EBko *NextGenerationEU* funtsak ere kontuan hartuta, aukera paregabea eskaintzen duela bizitegi-parkearen birgaitze-tasa bizkortzeko.

Zenbatetsitako MXL ereduak erakusten duenez, inbertsio-kostuez gain, etxeetako ezaugarri batzuek birgaitze energetikoen ezarpena azal dezakete neurri handi batean. Beraz, gomendagarria litzateke determinatzaile horiek energia-eraginkortasuneko politiken diseinuan sartzea, etxejabeen erabakietan eragiten baitute. Etxeko errentak eragin handia du fatxadak isolatzeko erabakian: diru-sarrerara txikiko etxeek joera gutxiago dute birgaitze energetikoa inbertitzeko. Etxejabeen adina aldagai garrantzitsua dela ere ikusi da. Etxejabe erretiratuek, gazteenek eta adin ertainekoek baino prestasun handiagoa erakusten dute fatxada isolatzeko, baina erretirotik gertu dauden pertsonak dira hori egiteko joera handiena dutenak. Etxeko berokuntza-sistema ere modu adierazgarrian sartu da ereduaren, berokuntza-sistema zentralerako etxeek fatxada birgaitzeko prestasun txikiagoa dutelarik. Aztertu beharra dago ea joera hau etorkizun hurbilean mantendu egiten den, bere energia ordaintzeko metodoa banakatzen denean. Berokuntza sistema elektrikoa duten etxeetan ere, fatxadako isolamendu termikoa inbertitzeko probabilitatea txikiagoa da gas naturalaren kontsumitzaileekin alderatuta. Halaber, emaitzak berresten du haurrak dituzten etxebizitzak baliagarriagoa ikusten dutela fatxada birgaitzea. Hau guztiaren ondorio nagusia hurrengoa da: etxeen aniztasuna sakonago aztertzeak, baliabide publikoak mobilizatzea eskatzen duten lehentasuneko helburuak identifikatzea eta birgaitze-tasa hobetzea baimenduko luke.

MXL ereduak hainbat laguntza-mekanismo hartzen ditu barne (hau da, diru-laguntzak, finantzaketa biguna, kenkari fiskalak), fatxaden birgaitze energetikoa izan ditzaketen eragina ebaluatzeko aukera emanez. Funtzionalitate hori frogatzeko, hiru eraikin-arketipoen kasuak aztertu dira. Egiaztatu da fatxada isolatzeko probabilitatea linealki handitu egiten dela diru-laguntzaren mailarekin. Eraikin baten isolamendu termikoa benetan gauzatuko dela bermatzeko beharrezkoa den diru-laguntza desberdina da kasu bakoitzean, baina, nolana

ere, dauden laguntza-programek ezarritako diru-laguntzak baino txikiagoa da. Beraz, ikuspegi orokor baten orde, askotan Estatu-mailako politika amankomuna dena, etxebizitza-kategoria ezberdinentzako berariazko laguntza-mekanismoek pizgarri-programen eraginkortasuna handituko lukete. Alde horretatik, finantza-baliabide publikoak ahalik eta hobekien esleitzeko, hurbilagoko ikuspegia beharrezkoa da, eta hau tokiko agintaritzetan oinarritu liteke.

Errenta handiagoko erdiguneari dagokion bloke solidoko eraikin-arketipoan, zeinen fatxada-azalera txikiagoa den eta, ondorioz, birgaitzearen inbertsio-kostua baxuagoa, azken hau inolako diru-laguntzarik gabe egingo litzateke. Hortaz, *free-riding* potentziala ahalik eta gehien murrizteko, garrantzitsua izan daiteke arduradun-politikoek faktore hauek kontuan izatea pizgarri-politikak definitzean.

Halaber, laguntza-politiken efizientzia hobetu egin daiteke diru-laguntzak beste neurri batzuekin konbinatuz, hala nola mailegu bigunekin edo kenkari fiskalekin. Horrek zuzeneko diru-laguntzekin lotutako gastu publikoa murrizten lagun dezake. Emaitzen arabera, diru-sarrerara ertain eta handiko etxeek kenkari fiskalak nahiago dituzte, finantzaketa bigunaren aldean. Kenkari fiskala handituz, beharrezkoa den diru-laguntza erdira murriztu daiteke, gutxi gorabehera. Bestalde, inbertsioa finantzatzeko kredituen mende are gehiago daudenez, diru-sarrerara txikiko etxeek balio handiagoa ematen diote balizko finantzaketa bigunari. Azken honen eragina, bestela, mugatua da.

Azkenik, aipatu beharra dago burututako azterketak zenbait muga dituela, datu-bilketaren mugekin lotuta daudenak; beraz, aukera diskretuko erduan sartutako aldagai esplikatzailak fatxada berritzeko erabakian eragina duten faktoreen multzo mugatu bat baino ez dira. Beste datu garrantzitsu batzuk, hala nola eraikinaren adina, haren kontserbazio-egoera, etxearen diru-aurrezkia, etab., analisitik kanpo utzi dira, *online* galdeketa baten esparruan inkestatuen lan-ahalegina mugatzeko. Alde horretatik, azterketa honek etorkizuneko ikerketetarako erreferentzia-oinarri interesgarria eskaintzen du, non datuak biltzeko errekurtsio gehiagorekin ikerketa hau hedatu ahalko litzatekeen.

## 6.2 Etorkizunerako ikerketa-lerroak

Aurkeztutako ondorioetatik haratago, tesi honetan burututako ikerketak egiaztatu du eraikinen birgaitze energetiko optimoen analisi eta sustapenean bide luzea dagoela egiteko.

Alde batetik, eskuragarri dauden datu-iturriekin lotutako mugak existitzen dira, ikerketa zailtzen dutenak. Beraz, interesgarria izan liteke datu-base berrien garapena ikertzea, hala nola informazio geografikoko tresnen bidez, eraikinen eraginkortasun energetikoarekin lotutako informazioa bildu eta bere erabilera errazteko.

Bestalde, garatutako ikerketaren ahulezietako bat bildutako laginen tamaina mugatua izan daiteke, lehenengo fasean zein hirugarrenean. Beraz, interesgarria izan daiteke baliabide gehiagorekin bildu litezkeen lagin handiagoek antzeko emaitzak emango lituzkeen egiaztatzea.

Halaber, burututako ikerketaren alderdi batzuetan sakontzeak zenbait ikerketa-lerro garatzeko aukera eskaintzen du, besteak beste:



- Eraikin arketipo ezberdinen arabera berokuntza sistemen eta etxe errenten banaketak aztertzea, aukera diskretuko eremuan erabilitako aldagai esplikatzaileekin bat datozen bi parametro hauen arabera desagregazio adierazgarri bat ere lortzeko.
- Azken urtean zehar bizi izandako energia prezioen, inflazioaren eta interes-tasa finantzarioen paradigma-aldaketaren eragina aztertzea, eraikin arketipo ezberdinen kostu-maila optimoan.
- Balioetsitako aukera diskretuko eredu hedatzea, aldagai esplikatzaile berrien eragina aztertuz; hala nola, eraikinaren adina, haren kontserbazio-egoera, etxearen diru-aurrezkia, etab.

Tesi honek ikerketa gehigarrientzako oinarriak finkatzen ditu ere. Erabiltzen dituen informazio-iturri nagusiak kontuan hartuta, metodologia hau Estatu mailako edozein hiritan litzateke aplikagarria, Bilborentzako burututako analisia beste kokapen batzuetan erreplikatzeko aukera emanez.

Era berean, burututako bizitegi-parkearen karakterizazioan eta estimatutako MXL eremuan oinarrituta, erabiltzaileetan oinarritutako epe-luzeko modelizazioak (*agent-based modelling*) gara daitezke. Oro har, etorkizuneko deskarbonizazio-bideak aztertzeko erabiltzen diren eraikin-ereduek arreta mugatua eskaintzen diote etxejabeek erabakiak hartzeko prozesuari, eta exogenoki definitutako eraikinen birgaitze-tasak erabiltzen dituzte. Beraz, aldi bakoitzean zenbat etxebizitza berrituko diren aurreikusten dutenez, ikuspegi horiek ezin dute laguntza-politiken (diru-laguntzak, mailegu bigunak, kenkari fiskalak, etab.) benetako eragina adierazi modelatutako birgaitze-tasan. Aldiz, balioetsitakoa bezalako aukera diskretuko ereduak konbinatuta, pizgarri desberdinen eraginkortasuna simulatzen duten berritze-agertokiak eraiki litezke [110]. Hau funtsezko tresna izango litzateke politika-egileei etxebizitza-sektorearen eraginkortasun energetikoa bultzatzeko estrategia alternatiboak konparatzen eta eraginkorrenak identifikatzen laguntzeko.



## Eranskinak

### I. Argitaratutako lanak

# 1. Artikulua

FERNANDEZ, J.; DEL PORTILLO, L.; FLORES, I. *A novel residential heating consumption characterization approach at city level from available public data: Description and case study*, Energy and Buildings, 2020, vol. 221, 110082.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110082>

**Aldizkaria:** Energy and Buildings

**ISSN:** 0378-7788

**Kalitateko adierazleak (2020):**

- Eragin faktorea: 5,879
- Journal Citation Indicator-aren (JCI) araberako sailkapena:

| Kategoria                          | JCI Rank | JCI Quartile | JCI Percentile |
|------------------------------------|----------|--------------|----------------|
| Construction & Building Technology | 13/87    | Q1           | 85,63          |
| Energy & Fuels                     | 25/133   | Q1           | 81,58          |
| Engineering, civil                 | 21/172   | Q1           | 88,08          |

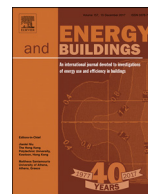
eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Bizitegi-parkeen birgaitze energetikorako ikuspegi  
integrala: Bilboko kasua**



# A novel residential heating consumption characterisation approach at city level from available public data: Description and case study

Jon Fernandez\*, Luis del Portillo, Iván Flores

Department of Thermal Engineering, University of the Basque Country, Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, Bilbao 48013, Spain

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 13 October 2019

Revised 29 March 2020

Accepted 22 April 2020

Available online 29 April 2020

### Keywords:

Building stock modelling

Archetype buildings

Residential sector

Energy efficiency

Space heating

## ABSTRACT

In the current transition towards a net-zero GHG emissions economy, residential building sector is one of the sectors with highest potential for energy efficiency. In order to assist the implementation of energy saving policies, in which the role of local authorities is crucial, the bottom-up engineering approach is the most suitable method for a reliable characterisation of the energy consumption in an existing building stock. In the present paper a methodology is proposed to characterise the space heating energy consumption of a residential stock at city level, based on archetype buildings. The methodology is focused on addressing the challenges which often such approach involves. An evidence-based calibration procedure is proposed to address occupant behavioural patterns. Attention is also given to the constructed models results validation process, by comparing them with collected real data. The methodology is applied to the residential building stock of the city of Bilbao, where seventeen typologies of archetype buildings are constructed. The results demonstrate the practicability of accurately reproducing the existing space heating energy consumption of a city-scale residential building stock with available public data sources. The methodology has been conceived to be easily replicable to any city.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Recently the average concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere reached 403 ppm, which is a value about 40% higher than in the mid-1800s [1]. Based on scientific evidence, human-induced global warming has already reached 1 °C above pre-industrial levels, and is increasing at approximately 0.2 °C per decade [2]. So the trend is clear. Climate change is a serious concern that deserves immediate action.

In this context, the European Union (EU) has taken a role of global leadership in reducing greenhouse gas (GHG) emissions, recognising for a long time climate change as an issue where coherent EU action is needed. The European Council confirmed in February 2011 the EU's objective of reducing GHG emissions by 80–95% by 2050 compared to 1990 [3]. In the European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy [4], the EU ratified its interest in working towards a net-zero GHG emissions economy by mid-century.

In this transition towards a competitive low carbon economy, building sector has been identified as one of the sectors with the highest potential for energy efficiency and GHG emission reduction. Indeed, in the EU the building sector causes 36% of the green-

house gases (GHG) and is responsible for 40% of the EU's final energy consumption. One reason for these high rates is that about 35% of the EU's buildings are more than 50 years old [5]. Unfortunately, the replacement rate of existing buildings in Europe is low, accounting for approximately 1–3% per year [6]. Therefore the influence of new buildings in energy use and emission reduction is limited, which makes the current building stock a main target for energy saving policies.

In order to implement such policies, and determine priority targets that require mobilisation of investment, a reliable characterisation of the energy consumption distribution across the building stock is essential. To his effect, several methods have been proposed, which according to two in-depth reviews [7,8] can be divided into two main approaches: top-down and bottom-up. The top-down approach addresses the building stock energy consumption in an aggregated way, by assessing the impact of different factors, mainly socioeconomic, on it and determining their effect. On the other hand, bottom-up methods are developed from data of disaggregated elements, whose impact on energy consumption of a representative set of buildings is combined, and then extrapolated to the entire building stock. Within bottom-up methods, statistical (SM) and engineering methods (EM) are distinguished, depending on the nature of their input data. SM are based on historical consumption data, while EM rely on building physics definition and simulation [7].

\* Corresponding author.

E-mail address: [jfernandez164@ikasle.ehu.eus](mailto:jfernandez164@ikasle.ehu.eus) (J. Fernandez).

Each method provides results with different applicability. Both top-down and bottom-up SM are capable to consider in their results the behaviour of occupants, which is always unpredictable and varies widely. Nevertheless, these methods do not reach the level of detail which is required to identify the specific underlying building elements with the largest energy efficiency improvement potential.

This information, which is crucial to estimate how different energy saving measures could affect the current energy consumption, can only be provided by bottom-up EM. However, these methods have also some limitations which must be overcome to reach trustworthy building models. Kavcic et al. [8] concluded that one of their main weaknesses is the inherent uncertainty associated with many model inputs, especially those related with the unpredictable nature of occupant behaviour. Furthermore, bottom-up EMs require large amount of input data, both to construct the models and to validate them, and often studies are limited by the absence of publicly available data. Thus, model inputs-related assumptions, which need to be based on author's experience when enough supporting data is not available, could leave the models with too many degrees of freedom and lack of credibility. Therefore, important focus should be given to the reliability of the models.

Bottom-up EMs typically classify an existing building stock into a set of reference or prototypical buildings that constitute the modelled domain, whose results are later extrapolated to the entire stock. There are two main approaches: i) the selection of a sample of real buildings [9], and ii) the development of archetype buildings [10], also called synthetic or virtual buildings. Archetype buildings are theoretical buildings created by a composite of several characteristics found within a category of buildings with similar attributes [11]. Potentially, the use of actual building samples could more faithfully reflect the heterogeneity of an existing building stock than archetype buildings. Nevertheless, a deep consideration of such high degree of diversity could require a large sample of representative buildings. Otherwise, an expert analysis is required to avoid that contextual features of the chosen sample jeopardise the extrapolation of the modelling results. In the end, the choice between these options could be made based on expert enquiries, statistical data availability, etc. [12,13].

Several authors have developed bottom-up building stock models of multiple European countries [14–17]. In addition, several efforts such as TABULA and EPISCOPE projects [18] have tried to also contribute to a comprehensive description of existing building stocks at national level. However, working with such large building stocks necessarily limits the representation of their heterogeneity. Indeed, a single country can have multiple climatic zones, which affect residential energy consumption. Traditional constructive solutions can also differ between different regions, which in turn could have been developed in different historical periods and architectural styles. Even significantly unequal socioeconomic factors can exist between territories. All of this makes necessary to analyse a specific building stock energy consumption from a much closer perspective.

On the other hand, in the implementation of energy efficiency policies, local authorities have a crucial role to play. With this in mind, in 2008 the European Commission launched the Covenant of Mayors [19], the mainstream European initiative which involve thousands of local governments voluntarily committed to implement EU climate and energy objectives. In this sense, the development at city level of bottom-up building stock models could adequately describe the heterogeneity of the building stock and serve as a basis to predict the potential energy savings and outline measures for Sustainable Energy and Climate Action Plans.

Recent improvements in geo-referenced data availability and geographical information systems have allowed greater focus on urban contexts [20], encouraging intensive and detailed spatio-

temporal assessments. Thus, Urban Building Energy Modelling (UBEM) [21] is a growing field in building energy modelling which accounts for not only the dynamics of individual buildings but also for the inter-building effects and urban microclimate, covering a spatial scale up to an entire city [22]. UBEM is often based on sophisticated methods which can combine buildings physics modelling, statistical inference in GIS environments, CFD programs to account for urban climatic conditions and energy supply simulation modules [23–25], which involves greater data management requirements and computational resources.

In fact, the development of city-scale databases of the existing building stocks is a crucial step of UBEM to automatically generate energy models of urban buildings. Building data needs for UBEM typically include the GIS footprint, building height, number of stories above ground, number of stories below ground, total floor area, heated floor area, number of dwellings, year of construction, year of refurbishment, building type, heating system type, annual electricity use, annual natural gas use, etc. [26]. Although more and more cities in the world are making their building stock data publicly accessible at their open data portals [27], it is not always available or is difficult to collect.

While extracting geometric building data from GIS databases is a relatively straightforward process [23], considering explicitly, but roughly, each urban building could lead to the generalisation of the building models, losing accuracy on the dynamics of the building energy demand [28].

On the other hand, the consideration of the spatial (geographical) dimension on energy analyses is crucial for the optimisation of energy supply systems and the assessment of related strategies as peak shaving, load shifting, etc. [29]. Nevertheless, demand-side analyses evaluating overall annual energy savings potential over an existing building stock does not necessarily require it.

To this effect, a new methodological approach has been developed by the authors to characterise an existing building stock at city level, aiming to set a comprehensive basis for further energy efficiency investment mobilisations assessments. The proposed methodology lies on a bottom-up engineering approach, which permits to construct and assess archetype building models that represent an entire building stock. In summary, the proposed methodology serves to (a) classify an existing city-scale residential building stock into a set of representative archetype buildings and, (b) reliably characterise their space heating energy consumption. The aim is not to focus on the geographical dimension perspective rather than to faithfully account for the dynamics of archetype buildings models, reaching a successful trade-off between the required detail of input data and desired precision.

Special care has been given to its applicability to multiple cities, as models become actually useful only if they are suitable for being easily replicable. The approach has been conceived to be applicable to any city, provided a primary understanding of the constructive evolution in the analysed geographical context. Although the implementation described herein is tailored to the Spanish context, similar data sources can be found in many other countries. The kind of data that the procedure involves is often publicly available. Real information availability limitations have also been considered, which can sometimes make the implementation of the methodology more arduous. Accordingly, the methodology also contributes to the management of data collection related difficulties by proposing easy ways of gathering further information.

In addition to addressing the problem of data availability, the methodology also focuses on the other limitations of bottom-up EM. An empirical method is proposed to address the actual occupant behaviour and calibrate the building models. Due to the capability of statistical methods to incorporate the occupant's behaviour impact, the methodology also incorporates the application

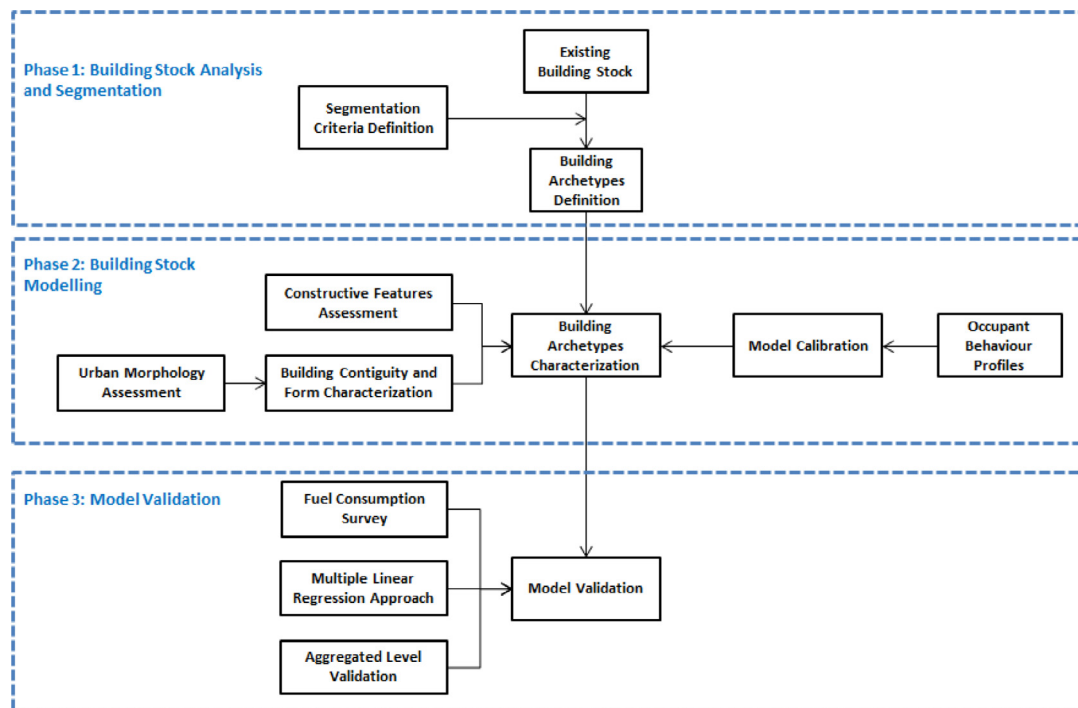


Fig. 1. Overall structure of the applied bottom-up methodological approach.

of a multiple linear regression for the process of validation of the models.

In the present paper, the aforementioned methodology is applied to the residential building stock of Bilbao, by constructing a comprehensive building stock aggregation model. It demonstrates the practicability of characterising the energy consumption of a city-scale residential building stock with available data sources. This way, a trustworthy basis can be formed for a subsequent assessment of the impact of different energy saving policies. The models lay the groundwork for the assessment of different energy conservation measures' effect, representing a useful decision-making tool to identify cost-optimal sets of measures per building type and establish the appropriate energy efficiency strategies. These aspects are currently being addressed in further work.

The paper is structured as follows. Section 2 summarises the methodological approach followed for this study, divided in three different phases. Section 3 describes the implementation of the procedure to the case study of Bilbao. Section 4 provides and analyses the results. The paper ends with a final Section 5 which outlines most important conclusions.

## 2. Methodological framework

A comprehensive description of the methodology is provided by Fernandez et al. [30]. The main guidelines are summarised herein to enable the understanding of the case study presented in this paper, which enables to further elaborate the approach presented in this section. The conceptual scheme of the methodology is presented in Fig. 1. The methodology is divided into three main phases: Building Stock Segmentation, Building Stock Modelling and Model Validation.

Phase 1 aims to determine the archetype buildings to be modelled and simulated. The archetype buildings are obtained through the combination of three segmentation criteria:

- building construction period (related to energy regulation)
- building height, in terms of the number of storeys over ground
- dwelling useful area

The heating system type is not introduced as a segmentation parameter, as it is preferable to perform energy performance simulations in terms of energy demands, which could be later converted to consumption terms by applying the corresponding mean seasonal efficiencies. Thus the definition of excessive segmentation criteria is avoided, permitting a deeper classification of the building stock based on the proposed three criteria.

By combining the segmentation criteria, a cluster map is generated, which permits to identify the most representative dwelling groups.

To carry out the analysis, the main data source is the Population and Housing Census from the National Statistics Institute [31]. It should be noted that, as usually happens with this type of sources, most of its data refers to individual dwellings, not entire buildings, while the archetypes to be constructed and simulated are entire buildings, and not individual dwellings. Therefore, different homogeneous group representativeness must be first assessed in terms of individual dwellings, and afterwards a relation must be set between those representative dwellings and the related archetype buildings, which are constituted by the formers.

In Phase 2, each archetype building is defined by its physical and technical parameters, as well as other data inputs required for the model construction. The construction of archetype building models often requires large amount of data as input, but there are certain building features which have higher influence than others on its thermal behaviour. The following three main factors have been identified as the most significant affecting the thermal performance of a building, which deserve special attention: i) building facade composition, ii) urban form where a building is located, which affects the building form and contiguity and, iii) occupant behaviour profiles. In addition, a useful empirical calibration method is proposed.

Finally, Phase 3 explores innovative methods to obtain real dwelling consumption data, in order to compare them with the archetype buildings simulations results and thus validate the models. An original survey is suggested to easily collect actual fuel consumption information from individual inhabited dwellings. In addi-

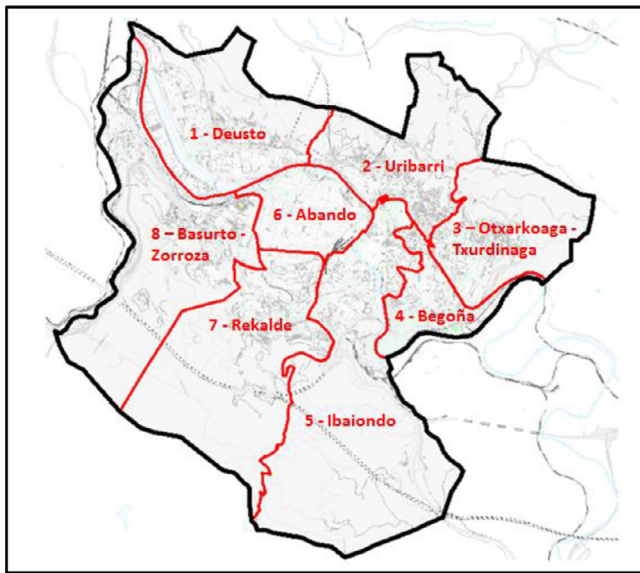


Fig. 2. Spatial distribution of the districts of Bilbao.

tion, a bottom-up statistical regression approach is proposed to obtain the heating demand of different dwelling typologies. Several studies exist which utilise postal code level energy consumption data in a regression [32,33]. Instead, this methodology adapts to the available data sources and alternatively applies the regression approach at regional scale, by using aggregated municipal-level domestic consumption values.

### 3. Methodology application: case study

In order to show the application of the proposed approach, the developed methodology is applied to the residential building stock of Bilbao. Located in the province of Biscay, Basque Country region, Bilbao is the largest city in northern Spain, with a population of approximately 350,000 inhabitants. The urban area, located in a river valley, is surrounded by two mountain ranges on the northern and southern sides. The municipality is divided into eight districts, which are indicated in Fig. 2.

Heating energy used in the residential stock is mainly provided from natural gas (approx. 50%). Apart from natural gas, the most used energy carriers for space heating are electricity (30%) and oil derivatives (20%, including gasoil and LPG). Gasoil is mainly used in communal heating systems, while natural gas and electricity are mostly used in dwelling's individual systems. The rest of fuels, such as wood or coal, are verified negligible.

#### 3.1. Building stock segmentation

The present analysis focuses on main dwellings, i.e. dwellings which are used all year round, acting as usual home, and excludes secondary (occasionally used) and empty dwellings. Main dwellings represent more than the 90% of Bilbao's residential stock [31], and account for a stock of 147,655 houses, which is the target of the study.

Fig. 3 shows the distribution of Bilbao's main dwellings according to their construction period. Almost the half of the existing building stock was constructed within a timeframe of only 20 years, between 1960 and 1980, during the so-called *Developmentalism* period. In addition, approximately the 80% of the houses were constructed before the application of the Spanish NBE-CT-79 regulation [34], which came into force in 1979 and with which the utilisation of building thermal insulation commenced. On the

### Dwellings Distribution

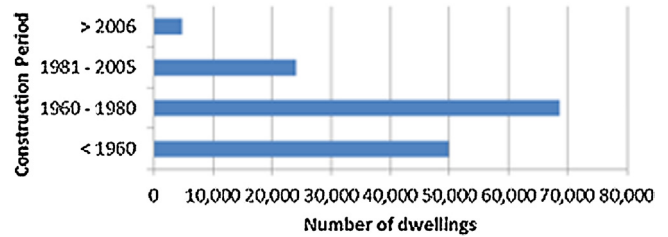


Fig. 3. Distribution of Bilbao's main dwellings according to their construction period.

other hand, the number of houses that comply with the subsequent (more stringent from the energy point of view) CTE regulation [35], in force since 2006, is very low.

There is literature which, when classifying an existing building stock, differentiates between single-family houses and multi-family houses [36,37]. Nevertheless, Bilbao has very few single-family houses (probably due to the complicated topographic nature and historical land scarcity), which are less than 1% of the entire building stock [38], and therefore this segmentation criterion is excluded for building classification.

By combining the three segmentation criteria proposed in the methodology, Table 1 is generated, which permits to identify the most representative groups of dwellings.

Only dwelling types with a share greater than 2% are selected, resulting in the 17 representative dwellings shown in Table 1, which are named from "RD 1" to "RD 17". All together, they represent the 87.90% of the total residential stock of Bilbao, which is considered representative enough.

The archetypes to be modelled and simulated are entire buildings, not individual dwellings, and therefore a relation is established to transform each representative dwelling into an archetype building. To do so, the following approach is applied:

- Every dwelling contained in each archetype building is equal and corresponds to one of the defined representative dwellings.
- Every storey of the archetype building is equal: it has the same number of dwellings, and therefore has the same plot area.

So the last aspect to be defined is the total amount of dwellings per building type, and its distribution along the building storeys. The dwellings quantity of each archetype building is determined aiming to be as nearest as possible from the average values obtained from [38]. At the same time, archetype's number of storeys is also defined, adjusting it within the range of the corresponding building type. It is assumed that there is no dwelling in the ground floor. Table 2 shows the obtained dwellings distribution per archetype building.

#### 3.2. Building stock modelling

The following main input data categories are presented herein: i) geometrical characteristics, ii) construction characteristics and, iii) occupant behaviour profiles.

##### 3.2.1. Geometrical characteristics

The main aim of this section is to determine the geometrical properties of the archetype buildings i.e. their shape and contiguity. To this effect, Bilbao's urban morphology is analysed.

**Historical urban development:** Initially, Bilbao's historical urban development is assessed to better understand and classify the different urban fabric zones of the city. The evolution of the city has resulted in clearly differentiated urban morphologies, which can be identified and associated with the different neighbourhoods.



**Table 1**  
Bilbao's main dwelling cluster map.

| Construction Period | Storeys over ground (incl. ground floor) | Dwelling's floor area |                      |                       |                      |
|---------------------|--|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
|                     |  | < 60 m <sup>2</sup>   | 60–90 m <sup>2</sup> | 90–120 m <sup>2</sup> | > 120 m <sup>2</sup> |
| < 1960              | < 3                                      | 0.47%                 | 0.09%                | 0.05%                 | 0.06%                |
|                     | 4 – 6                                    | <b>5.85%</b> RD1      | <b>6.37%</b> RD2     | 1.32%                 | 0.23%                |
|                     | 7 – 9                                    | <b>3.72%</b> RD3      | <b>8.38%</b> RD4     | <b>3.42%</b> RD5      | <b>2.40%</b> RD6     |
| 1960–1980           | > 10                                     | 0.22%                 | 0.68%                | 0.28%                 | 0.06%                |
|                     | < 3                                      | 0.10%                 | 0.00%                | 0.00%                 | 0.00%                |
|                     | 4 – 6                                    | <b>4.79%</b> RD7      | <b>5.56%</b> RD8     | 0.92%                 | 0.00%                |
|                     | 7 – 9                                    | <b>5.10%</b> RD9      | <b>12.93%</b> RD10   | <b>2.82%</b> RD11     | 0.83%                |
|                     | > 10                                     | <b>2.90%</b> RD12     | <b>9.13%</b> RD13    | <b>3.59%</b> RD14     | 0.81%                |
| 1981–2005           | < 3                                      | 0.00%                 | 0.06%                | 0.00%                 | 0.00%                |
|                     | 4 – 6                                    | 0.65%                 | <b>3.99%</b> RD15    | 0.47%                 | 0.00%                |
|                     | 7 – 9                                    | 1.10%                 | <b>4.93%</b> RD16    | 1.52%                 | 0.11%                |
|                     | > 10                                     | 0.00%                 | <b>2.01%</b> RD17    | 0.53%                 | 0.00%                |
| > 2006              | < 3                                      | 0.00%                 | 0.00%                | 0.00%                 | 0.00%                |
|                     | 4 – 6                                    | 0.13%                 | 0.80%                | 0.00%                 | 0.00%                |
|                     | 7 – 9                                    | 0.13%                 | 0.36%                | 0.08%                 | 0.00%                |
|                     | > 10                                     | 0.00%                 | 0.05%                | 0.00%                 | 0.00%                |

**Table 2**  
Dwellings distribution per archetype building.

| Construction Period | Storeys (incl. ground floor) | Storeys (excl. ground floor) | Representative dwellings per storey | Dwellings obtained per archetype building | Average dwellings per building - [38] |
|---------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Before 1960         | 4–6                          | 4                            | 2                                   | 8   | 8.40                                  |
|                     | 7–9                          | 7                            | 2                                   | 14  | 13.92                                 |
| 1960–1980           | 4–6                          | 4                            | 3                                   | 12  | 13.07                                 |
|                     | 7–9                          | 6                            | 3                                   | 18  | 18.17                                 |
|                     | > 10                         | 12                           | 3                                   | 36  | 37.92                                 |
| 1981–2005           | 4–6                          | 4                            | 3                                   | 12  | 12.46                                 |
|                     | 7–9                          | 6                            | 3                                   | 18  | 18.24                                 |
|                     | > 10                         | 13                           | 3                                   | 39  | 39.06                                 |

On the one hand, in Bilbao a relation exists between the predominant urban morphology of an area and its topography. Thus, the flat sites of the city centre, in the middle of the valley and around the river, show a solid block urban fabric, typical of 19th century Ensanche (city expansion in Spanish, which grew up in orthogonal layout beyond the existing Old Town). In turn, in the hillsides of the periphery the linear block is predominant, which better accommodates to the difficult topography.

On the other hand, a relation between the construction period and the urban block types is also noted. Due to the historical development of the city, whose demographic and construction boom coincided with the prevailing rationalist style, the linear block is predominant in the peripheral neighbourhoods created from the 60 s, during the *Developmentalism* period. In such areas, the building width, i.e. the structural span between facades, is often between 8 and 10 m long. Such narrowness, influenced by the hygienic ideal of the rationalism, allowed for crossed ventilation in the whole dwelling.

On the contrary, the facade length of buildings located within solid block urban fabric can change significantly. In the Old Town, where the oldest buildings are located (from 19th century and before), the facades are in general short, with a typical length of approximately 8 m. In contrast, late 19th century buildings in the Ensanche, which currently constitute the city centre, show usual facade lengths between 16 and 24 m.

**Considered urban blocks:** Based on the previous assessment, Table 3 shows the three urban form typologies considered in the present analysis: solid block, linear block and detached buildings. A building contiguity index, i.e. the envelope's portions in contact with other buildings or the environment, is allocated to each urban form.

In Bilbao, the influence of solar irradiation is less severe than in other Spanish cities. Based on [39] measured solar irradiation data, obtained during the 1983–2005 period, Bilbao is the Spanish capital city with the lowest solar irradiance, with a daily average of 3.54 kWh/m<sup>2</sup>. In addition, its particular topography, being located within a valley and surrounded by hills, makes it less exposed to the solar rays.

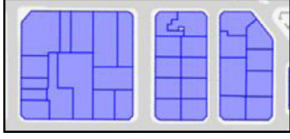


Therefore, the modelling of external shading created by the environment around a building is excluded from the analysis, which enables to include different urban layouts such as closed or open blocks with internal courtyards and linear blocks into a unique urban form typology, as it can be seen in Table 3. For the present analysis, all these urban layouts are considered equivalent in terms of their buildings shape and contiguity.

On the other hand, the small internal courtyards ("chimney courtyards") that might exist within a solid block layout are excluded from the assessment.

**Shape and contiguity allocation to archetype buildings:** Firstly, the geographic distribution of each representative dwelling is analysed, with the aim of identifying the city districts where a specific representative dwelling is concentrated the most (to this effect, "archetype building" term and its corresponding "representative dwelling" can be interchangeably used). It shall be noted that, at this point, having defined building height and dwelling useful area as segmentation criteria contributes to a clearer concentration of archetypes in specific districts. As an example, Table 4 indicates the district distribution that corresponds to each RD according to [31], in which the coloured cells show the districts where each RD is mainly concentrated.

Ageing maps are built for each neighbourhood or city zone, for which the public data provided by the cadastre is used regarding year of construction of the buildings. Two examples of the con-

**Table 3**  
Urban form types considered for urban form allocation to archetype buildings.

| Urban Form         | Characteristics   | Examples   | Allocated contiguity index                                |
|--------------------|---|--|---|
| Solid Block        | Typical of the 19th century Ensanche. The building is integrated within a building compact layout, with a unique facade facing the street.                                  |   | 3 out of 4 envelope sides in contact with other buildings |
| Linear Block       | Typical rationalist block framed within the hygienic ideal of light, ventilation and sunlight, while addressing the lack of housing through simple buildings serialisation. |  | 2 out of 4 envelope sides in contact with other buildings |
| Detached Buildings | Buildings with no envelope's portion in contact with other buildings  |   | No envelope's portion in contact with other buildings     |

**Table 4**  
RD 7 representative dwelling distribution by district.

| Representative Dwelling type | City Districts |               |                       |               |               |               |               |                 | Total analysed dwelling share |
|------------------------------|----------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-------------------------------|
|                              | Deusto         | Uribarri      | Otxarkoaga Txurdinaga | Begoña        | Ibaiondo      | Abando        | Rekalde       | Basurto Zorroza |                               |
| RD 1                         | 11.90%         | <b>16.29%</b> |                       | <b>14.80%</b> | <b>23.65%</b> |               | <b>20.91%</b> | 12.45%          | 75.65%                        |
| RD 2                         | <b>33.93%</b>  | 9.74%         |                       | 6.89%         | <b>29.96%</b> |               | <b>13.33%</b> | 6.14%           | 77.23%                        |
| RD 3                         | <b>13.96%</b>  | 6.76%         |                       | 1.80%         | <b>24.55%</b> | <b>26.35%</b> | <b>17.45%</b> | 9.12%           | 82.32%                        |
| RD 4                         | 5.76%          | 4.55%         |                       | 2.07%         | <b>21.63%</b> | <b>40.27%</b> | <b>13.85%</b> | <b>11.87%</b>   | 87.62%                        |
| RD 5                         |                |               |                       |               | 9.45%         | <b>90.55%</b> |               |                 | 90.55%                        |
| RD 6                         |                |               |                       |               | 7.37%         | <b>92.63%</b> |               |                 | 92.63%                        |
| RD 7                         | 9.98%          | <b>24.94%</b> | <b>25.02%</b>         | <b>14.80%</b> | 4.42%         |               | <b>17.99%</b> | 2.86%           | 82.75%                        |
| RD 8                         | <b>21.66%</b>  | <b>30.23%</b> | 1.96%                 | <b>12.21%</b> | 6.32%         |               | <b>20.13%</b> | 7.49%           | 84.23%                        |
| RD 9                         | 10.21%         | 10.38%        | <b>14.91%</b>         | <b>19.69%</b> | <b>17.55%</b> | 4.70%         | <b>15.24%</b> | 7.33%           | 67.38%                        |
| RD 10                        | <b>16.46%</b>  | 8.71%         | 1.36%                 | 27.27%        | 14.66%        | 5.18%         | <b>14.33%</b> | 12.02%          | 72.73%                        |
| RD 11                        | <b>25.35%</b>  | 10.38%        |                       | <b>17.96%</b> | 2.99%         | <b>25.95%</b> | 2.79%         | <b>14.57%</b>   | 83.83%                        |
| RD 12                        | <b>13.29%</b>  | 9.93%         | <b>14.90%</b>         | <b>47.11%</b> | 5.37%         | 3.49%         | 3.22%         | 2.68%           | 75.30%                        |
| RD 13                        | <b>20.42%</b>  | <b>14.66%</b> | 10.49%                | <b>23.47%</b> | <b>12.54%</b> | 2.88%         | 9.53%         | 6.01%           | 71.09%                        |
| RD 14                        | <b>17.12%</b>  | <b>20.02%</b> | <b>16.58%</b>         | 7.10%         | 6.57%         | 10.87%        | <b>16.36%</b> | 5.38%           | 70.08%                        |
| RD 15                        | 7.79%          |               | <b>47.21%</b>         | 4.88%         | <b>17.33%</b> |               | 3.84%         | <b>18.95%</b>   | 83.49%                        |
| RD 16                        | <b>16.08%</b>  | 2.59%         | 4.77%                 | 6.95%         | <b>32.78%</b> | 4.05%         | <b>16.29%</b> | <b>16.49%</b>   | 81.64%                        |
| RD 17                        | 4.91%          |               | <b>31.01%</b>         | 4.65%         | <b>24.81%</b> |               | <b>28.94%</b> | 5.68%           | 84.75%                        |

**Table 5**  
RD 7 related urban morphology assessment, district by district.

| Construction Period | Dwelling features                | City District         | Share (%) | Predominant Urban Form Typology                         |
|---------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------|---|
| RD7 1960–1980       | 4–6 floors & < 60 m <sup>2</sup> | Otxarkoaga Txurdinaga | 25.02%    | Linear block  |
|                     |                                  | Uribarri              | 24.94%    | Linear block  |
|                     |                                  | Rekalde               | 17.99%    | Linear block  |
|                     |                                  | Begoña                | 14.08%    | No predominant typology: linear blocks and solid blocks |

structured building's ageing maps are shown in Fig. 4, which correspond to Otxarkoaga - Txurdinaga and Uribarri districts.

Afterward, focusing on the identified main districts for every archetype building, the archetype - related district's predominant urban form is assessed, by using the building's ageing maps. As an example, RD 7 related urban morphology is assessed in Table 5.

Finally, from the identification of the predominant urban form in each district, it is needed to converge to a unique urban form typology per archetype building, which applies to the whole city - scale. In the majority of archetype building cases, a predominant urban form typology tends to stand out, and therefore the outcome is straightforward. Following with previous example, a linear block form is allocated to the RD 7 (and therefore to the corresponding Arch. 7). Building layout dimensions, i.e. façade

length and building width, are also analysed within the presented approach.

Regarding the orientation of Bilbao's urban morphology, it can be verified that, in general, it does not follow a north-south and east-west pattern. The solid block morphology of the city centre is in general north-east orientated. On the other hand, the orientation of the linear blocks of the periphery is conditioned by its adaptation to the topography, being basically south-west or south-east. Depending on the area, this orientation could be more or less pronounced, and in some cases, the morphology tends to be slightly random.

Table 6 summarises the considered building layout dimensions and orientation for each archetype building model. A 20 m<sup>2</sup> stairwell layout area is considered for all the buildings. It also sum-



Fig. 4. Examples of maps with construction period of buildings.

**Table 6**  
Allocation of building layout dimensions and orientation to archetype buildings.

|         | Allocated Urban Block Typology | Storeys (excl. ground floor) | Dwellings per storey | Dwelling floor area (m <sup>2</sup> ) | Dwelling area per storey (m <sup>2</sup> ) | Total area per storey (m <sup>2</sup> ) | Facade length (m) | Building width (m) | Facade orientation |
|---------|--------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------------------------|--|---|-------------------|--------------------|--------------------|
| Arch.1  | Linear block                   | 4                            | 2                    | 60                                    | 120  | 140                                     | 14                | 10                 | south-west         |
| Arch.2  | Linear block                   | 4                            | 2                    | 75                                    | 150  | 170                                     | 17                | 10                 | south-west         |
| Arch.3  | Solid block                    | 7                            | 2                    | 60                                    | 120  | 140                                     | 8                 | 17.5               | west               |
| Arch.4  | Solid block                    | 7                            | 2                    | 75                                    | 150  | 170                                     | 14                | 12.1               | west               |
| Arch.5  | Solid block                    | 7                            | 2                    | 105                                   | 210  | 230                                     | 17                | 13.5               | west               |
| Arch.6  | Solid block                    | 7                            | 2                    | 120                                   | 240  | 260                                     | 20                | 13.0               | west               |
| Arch.7  | Linear block                   | 4                            | 3                    | 60                                    | 180  | 200                                     | 20                | 10                 | south-west         |
| Arch.8  | Linear block                   | 4                            | 3                    | 75                                    | 225  | 245                                     | 24.5              | 10                 | south-west         |
| Arch.9  | Linear block                   | 6                            | 3                    | 60                                    | 180  | 200                                     | 9.1               | 22                 | south-west         |
| Arch.10 | Linear block                   | 6                            | 3                    | 75                                    | 225  | 245                                     | 11.1              | 22                 | south-west         |
| Arch.11 | Solid block                    | 6                            | 3                    | 105                                   | 315  | 335                                     | 17                | 19.7               | west               |
| Arch.12 | Linear block                   | 12                           | 3                    | 60                                    | 180  | 200                                     | 20                | 10                 | south-west         |
| Arch.13 | Linear block                   | 12                           | 3                    | 75                                    | 225  | 245                                     | 9.4               | 26                 | south-west         |
| Arch.14 | Detached building              | 12                           | 3                    | 105                                   | 315  | 335                                     | 18.3              | 18.3               | south              |
| Arch.15 | Linear block                   | 4                            | 3                    | 75                                    | 225  | 245                                     | 20.4              | 12                 | south-west         |
| Arch.16 | Linear block                   | 6                            | 3                    | 75                                    | 225  | 245                                     | 13.6              | 18.1               | south-west         |
| Arch.17 | Linear block                   | 13                           | 3                    | 75                                    | 225  | 245                                     | 18                | 13.6               | south-west         |

marises the number of storeys and the amount of dwellings per storey, according to the outcomes of Table 2.

### 3.2.2. Construction characteristics

This section aims to analyse the most characteristic constructive features of the Basque Country, where the historical development of the facades is summarised below.

The facades of antique buildings were constructed by wide, load-bearing walls, as they were a structural part of the building. They experienced little change until the end of 19th century, and stone walls were used until the brick facades replaced them as usual constructive solution [40].

The introduction, from 1910 on, of the reinforced concrete from England and France started to change the way of constructing [41]. For the first time, the building envelope could be released from its bearing role, leading to less material use and weight relieve. The main way of achieving it was the introduction of the double layer facades with an intermediate air chamber. However, the new approach was rapidly disrupted by the Civil War and the correspond-

ing post-war period, until approximately the 60's, coinciding with the highest demographic growth that Bilbao has ever experienced.

[42] identifies usual facade constructive typologies of the Basque building stock, which can be summarised as follows:

- 19th century or before: heavy masonry or adobe walls.
- First half of the 20th century: single-layer, 1–1.5 ft. width, brick facades.
- 1960 – 1980, *Developmentalism* period: double layer facades with an intermediate air chamber of 5–10 cm, internal layer of hollow bricks and a total width of 23–26 cm. Thermal transmittance could vary between 1.2 and 1.6 W/m<sup>2</sup>K.

Constructive typologies referred to *Developmentalism* period are completely aligned with [43].

The next significant change in the facade's composition was the addition of an insulation layer, accommodated into the double layer solution, which was generalised from the 80's on, after the energy crisis and the subsequent Spanish NBE-CT-79 regulation in 1979. The thickness of the facade's insulation was calculated based on NBE-CT-79 requirements, in order the building not to exceed a

**Table 7**  
Facade type allocation to each archetype building.

| Facade   | Construction Period<br>U (W/m <sup>2</sup> K) | Before 1960 |     |     |     |     |     | 1960–1980 |     |     |      |      |      | 1981–2005 |      |      |      |      |
|----------|---|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|------|------|------|-----------|------|------|------|------|
|          |   | n.1         | n.2 | n.3 | n.4 | n.5 | n.6 | n.7       | n.8 | n.9 | n.10 | n.11 | n.12 | n.13      | n.14 | n.15 | n.16 | n.17 |
| Facade 1 | 2.04  |             |     | X   |     |     |     |           |     |     |      |      |      |           |      |      |      |      |
| Facade 2 | 1.77  | X           | X   |     | X   | X   | X   |           |     |     |      |      |      |           |      |      |      |      |
| Facade 3 | 1.26  |             |     |     |     |     |     | X         | X   | X   |      | X    |      |           |      |      |      |      |
| Facade 4 | 1.38  |             |     |     |     |     |     |           | X   |     |      |      | X    | X         | X    |      |      |      |
| Facade 5 | 0.63  |             |     |     |     |     |     |           |     |     |      |      |      |           | X    |      |      |      |
| Facade 6 | 0.93  |             |     |     |     |     |     |           |     |     |      |      |      |           |      | X    |      |      |
| Facade 7 | 0.75  |             |     |     |     |     |     |           |     |     |      |      |      |           |      |      |      | X    |

maximum thermal transmittance value called  $K_C$  global coefficient, which in turn depended on the building's shape factor.

On the other hand, the assessment of Building Assessment Reports can also provide information about the real distribution of described constructive solutions within a specific location. In Spain, the Building Assessment Report (IEE hereunder, based on Spanish acronym), after the corresponding building analysis, demonstrates the status of the building in relation with three aspects: its conservation condition, its compliance with the universal accessibility regulation and its energy efficiency. IEE regulation relies on national legislation, with the 8/2013 law [44] as the reference regulation until it was largely derogated by the RD 7/2015 [45], but it is the regional and municipal regulation which further deploys it, so slight differences could arise between the regions. Due to the kind of information that the IEE contains, which includes characteristics of the building's facades and roofs, it can be an important data source regarding building constructive solutions.

Totally, information about 115 buildings is analysed, all of them constructed before 1980. Due to the fundamental purpose of the IEE, i.e. the building conservation assessment, it is unusual to find it for newer constructions. It is verified that the current way of fulfilling the IEE reports, which does not obviously consider their potential usage as constructive solutions database, does not allow to take full advantage of them. Usually, the number of facade sheets is missing. Except for rare cases, no air chamber or double-sheet is explicitly mentioned. If this information were more clearly shown, interesting information could be provided, which could help on buildings thermal performance assessments, without greater onsite effort.

Nevertheless, analysed IEEs have still provided information about the roof type distribution in Bilbao. The roof types distinguished by the IEE are the sloping roof and the flat roof, while this last is further divided into crossable and non – crossable roofs. Information about materials is also given. In Bilbao, the sloping roof accounts for more than 90% of the buildings, with an unquestionable predominance of the tile as roof cover. The roof support is usually made of concrete, except for the most antique buildings in which wood predominates. The collected information is introduced into the archetype buildings models.

**Allocation of facade type:** The following criteria have been followed for facade type allocation to the archetype buildings:

- Facade 1, which is a structural facade constituted by heavy limestone masonry, is allocated to the oldest archetype building. In this case, it corresponds with Archetype 3, which is mainly located in the Old Town and surrounding areas. The other single-layer facade, formed by 1 ft. brick and defined as Facade 2, is assigned to the remaining archetype buildings corresponding to the construction period before 1960.
- Double brick wall without thermal insulation, Facade 3 and Facade 4, are allocated to the buildings constructed during the *Developmentalism* period.

- Facade 5, Facade 6 and Facade 7, which are the insulated double-layer facades, are introduced in post-1981 archetype buildings. Their insulation thickness is determined through an iterative approach performed until the regulatory  $K_G$  global coefficient is complied.

Table 7 summarises modelled facades.

### 3.2.3. Occupant behaviour – calibration

The main aim of this section is to define the profiles of dwelling's occupancy, space heating demand and internal gains, which must be introduced in the archetype building models. Instead of precisely describing specific occupant behaviours, the present approach seeks to assess general behaviours in Bilbao. To this effect, an empirical calibration method is used, based on real consumption data from residential buildings with communal heating systems, aiming to increase the reliability of introduced occupational behavioural profiles.

In this type of buildings with centralised heating systems, the 2012/27/EU directive [46] demanded the installation of metering devices on each individual dwelling from the 1st January 2017, with the aim each household to be invoiced for its specific energy consumption. The prevision of the transposition of the directive made many communities install the metering devices without even waiting for the Spanish law publication, which was delayed. The present approach aims to benefit from that circumstance, which implies that gathering only few communal invoices enables the collection of numerous dwelling's data, which even discriminates between Domestic Hot Water (DHW) and space heating consumption. Thus, the methodology proposes to collect the data from several post-1981 buildings, when the installation of communal systems became more usual in Spain. As NBE-CT-79 regulation was at that time in force, which imposed the compliance of specific transmittances in buildings, the envelope U-values can be more reliably determined.

Buildings whose communal consumption data is gathered are constituted by a great number of dwellings, which may be inhabited by all sorts of sociodemographic groups. The proposed method mainly relies on the assumption that ensemble, the contribution of each group in terms of buildings space heating consumption can be considered representative of what takes place at entire building stock level.

In order to define different aspirant profiles, the following assumptions are made with regard to the relation between the three profiles, i.e. occupancy, space heating demand and internal gains.

- Internal gains from lighting and equipment take place only during active occupancy period of the dwelling.
- It is assumed that the space heating set point temperature always applies during active occupancy period of the dwelling, while during unoccupied time periods the setback heating temperature operates.

|  |        | Hours |    |    |    |    |    |     |     |   |   |    |    |    |     |     |    |    |    |    |     |      |      |      |    |
|--|--------|-------|----|----|----|----|----|-----|-----|---|---|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|-----|------|------|------|----|
|  |        | 0     | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6   | 7   | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13  | 14  | 15 | 16 | 17 | 18 | 19  | 20   | 21   | 22   | 23 |
| Occupancy  |        |       |    |    |    |    |    |     |     |   |   |    |    |    |     |     |    |    |    |    |     |      |      |      |    |
| Equipment & Lighting<br>(over a max. of 8.8 W/m <sup>2</sup> ) |        |       |    |    |    |    |    | 10% | 10% |   |   |    |    |    | 30% | 30% |    |    |    |    | 50% | 100% | 100% | 100% |    |
| Space Heating<br>Set Point (°C)                                | Sc. A) |       |    |    |    |    |    | 19  | 19  |   |   |    |    |    | 19  | 19  |    |    |    |    | 19  | 19   | 19   | 19   |    |
|  | Sc. B) |       |    |    |    |    |    | 20  | 20  |   |   |    |    |    | 20  | 20  |    |    |    |    | 20  | 20   | 20   | 20   |    |
|  | Sc. C) |       |    |    |    |    |    | 21  | 21  |   |   |    |    |    | 21  | 21  |    |    |    |    | 21  | 21   | 21   | 21   |    |
|  | Sc. D) | 19    | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19  | 19  |   |   |    |    |    | 19  | 19  |    |    |    |    | 19  | 19   | 19   | 19   | 19 |
|  | Sc. E) | 20    | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20  | 20  |   |   |    |    |    | 20  | 20  |    |    |    |    | 20  | 20   | 20   | 20   | 20 |
|  | Sc. F) | 21    | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21  | 21  |   |   |    |    |    | 21  | 21  |    |    |    |    | 21  | 21   | 21   | 21   | 21 |

Fig. 5. Working days occupancy, internal gains and space heating demand profiles.

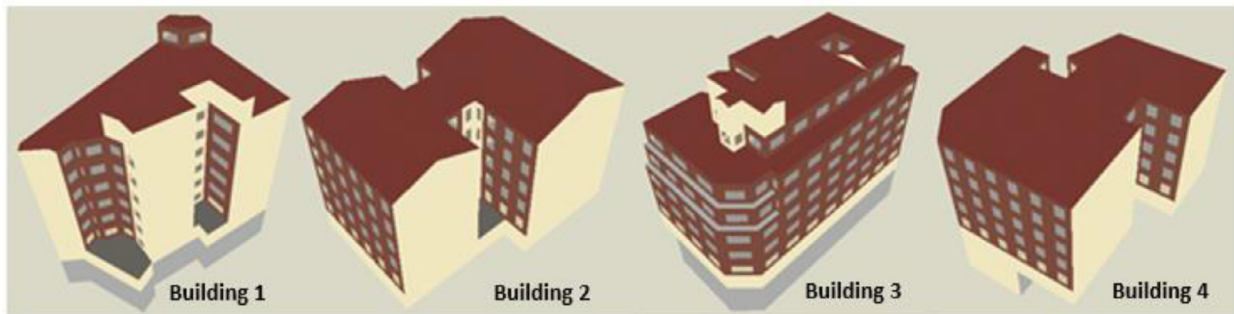


Fig. 6. Modelled real buildings.

In addition, an important factor that may significantly affect the definition of above-mentioned profiles is the employment status of the dwelling occupants. It can be verified that, for every archetype building, a majority of dwellings exist with all of its members working [31]. Therefore, a reference occupancy schedule is defined for working days, corresponding to a usual working timetable in Spain. It is shown in Fig. 5. Thus, the aim is to capture the general trends of behaviour, as an analysis evaluating overall annual energy savings most likely does not require a sophisticated stochastic occupant behavioural model [29].

According to the profiles of Fig. 5, six different space heating scenarios are defined (A, B, C, D, E, F), classified according to their heating set point temperature (19 °C, 20 °C, 21 °C), which is considered one of the most influential parameters in building energy models, and whether they consider that such set point temperature applies or not during night periods.

The determination of the number of real buildings to be used for calibration would depend on the size and specific heterogeneity of the analysed city. In this study, four real post-1981 buildings with communal heating systems, shown in Fig. 6, are chosen aiming to cover different orientations and locations within the urban morphology of the city. In total, they constitute 107 dwellings, which is considered representative for a middle-size city as Bilbao. Their annual heating energy consumptions data is collected through annual communal bills. The buildings are visited and modelled in Design Builder v.4.7.0.027 [47] with their actual orientation, form, size, contiguity and internal courtyards. External elements which may imply external shading are also modelled, as well as the basement floors.

Infiltration rate could also be introduced as a third calibration parameter in the calibration process. Nevertheless, the present implementation benefits from the availability of several Blower Door Tests results, which have been recently performed by the Uni-

versity of the Basque Country in post-1981 dwellings. Totally, 12 dwellings were analysed, resulting in an annual infiltration rate (at 4 Pa) of 0.57 (with a variance of 0.02), which is introduced in the four buildings models.

The six scenarios are modelled and simulated in each of the four buildings. The set of obtained space heating consumption values is compared to the building's real annual consumption value, averaged for different years with the aim of making the consumption value independent from any specific climatic condition's severity. The space heating profile that more faithfully approximates to the reality is selected.

Fig. 7 shows that the results vary significantly depending on the scenario, i.e. depending on the modelled occupant behaviour. In all cases, the scenario B provides an annual space heating demand which fits well the real data. Therefore, Scenario B is introduced within the modelled archetype buildings, which corresponds to a set point temperature of 20 °C and no heating set point during night periods. The number of occupants is modelled according to the average values provided by the INE for each representative dwelling [31].

### 3.3. Model validation data attainment

#### 3.3.1. Literature

An initial validation is proposed by using information from literature. Concerning the distribution of the residential energy consumption by different end-uses, the SECH-SPAHOUSEC project [48] is probably the most extensive study carried out in Spain. In dwellings located in the Atlantic climatic zone, where the city of Bilbao is located, the mean energy consumption is 10,331 kWh per year and the space heating end-use implies the 40.1% of it. Considering the mean floor area of 93.7 m<sup>2</sup> that the study defines for Atlantic zone dwellings, a mean annual space heating consumption of 44 kWh/m<sup>2</sup> is obtained.

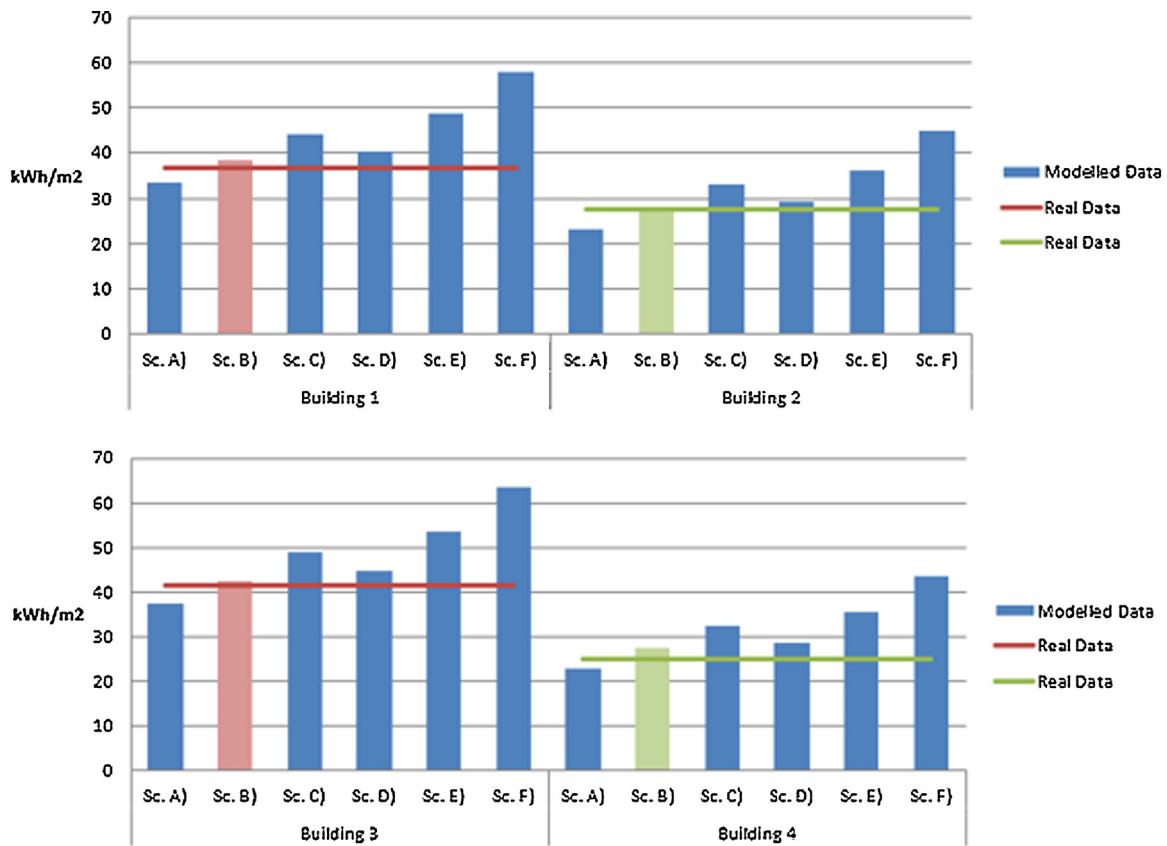


Fig. 7. Calibration results in terms of annual space heating energy demand.

Table 8

Fuel consumption distribution in the Coastal Climatic Zona of the Basque Country [49].

| Fuel consumption distribution (%) |     |
|-----------------------------------|-----|
| Space Heating                     | 59% |
| DHW                               | 30% |
| Cooking                           | 11% |

Concerning the domestic energy consumption distribution in the Basque Country, [49] provides, based on SECH-SPAHOUSEC data, a slightly adjusted fuel consumption structure for the Basque Country, which is shown in Table 8.

### 3.3.2. Fuel consumption survey

An excellent method for the validation of modelled building's heating demand is to gather actual energy consumption data from inhabited houses of Bilbao, which is contained in energy bills. To this effect, a survey is conducted, which aims to collect actual fuel consumption information from individual inhabited dwellings, by asking the survey respondents about their annual fuel use.

Nevertheless, the complexity that this type of survey entails is not trivial. Dwelling billing data is often considered private information, without an obvious disposition to share it. In addition, answering the survey implies the necessity of looking for a certain amount of bills which may cover at least one-year period, and summing the different monthly-invoiced consumptions, which is obviously tedious. An innovative approach is proposed, aiming to overcome those problems and facilitate data collection:

- It is only requested a picture of the graph that is included in any bill, which contains historical information about the fuel consumption of the last two years. The graph shows the dif-

ferent months in x-axis and the corresponding fuel consumption in kWh as y-axis. Thus, required response times are significantly reduced, without substantially affecting the quality of the collected data.

- In addition to the mentioned graph, three supplementary data are requested, which are easy to answer: dwelling address, number of inhabitants and kitchen type (electrical or fuel-fired). Dwelling address serves to obtain dwelling's area from the cadastre.

In total, 65 dwellings domestic fuel consumption data are collected, mainly for Bilbao but also from municipalities of its metropolitan area. The error of using this sample is estimated using Eq. (1) [50]. Provided Biscay's building stock volume, this sample gives a margin of error of 5 kWh/m², with an associated 90% confidence interval.

$$n = \frac{N \cdot z^2 \cdot \sigma^2}{(N - 1) \cdot e^2 + z^2 \cdot \sigma^2} \quad (1)$$

where  $n$  is the survey's size,  $N$  is the size of the population (building stock volume),  $Z$  is the accepted deviation from the mean value to achieve the assumed confidence level (given by the gaussian distribution form),  $e$  is the error margin and  $\sigma^2$  is the expected variance of the population.

Two different approaches are applied to analyse collected data. The first method, shown in Fig. 8, is based on DHW consumption estimation using summer period fuel consumption, and relies on the assumptions that during summer there is no space heating-related fuel use, and that DHW consumption is not likely to significantly vary with seasons. The second approach consists on the application of the average fuel use distribution (%) by domestic end-use, previously shown in Table 8.

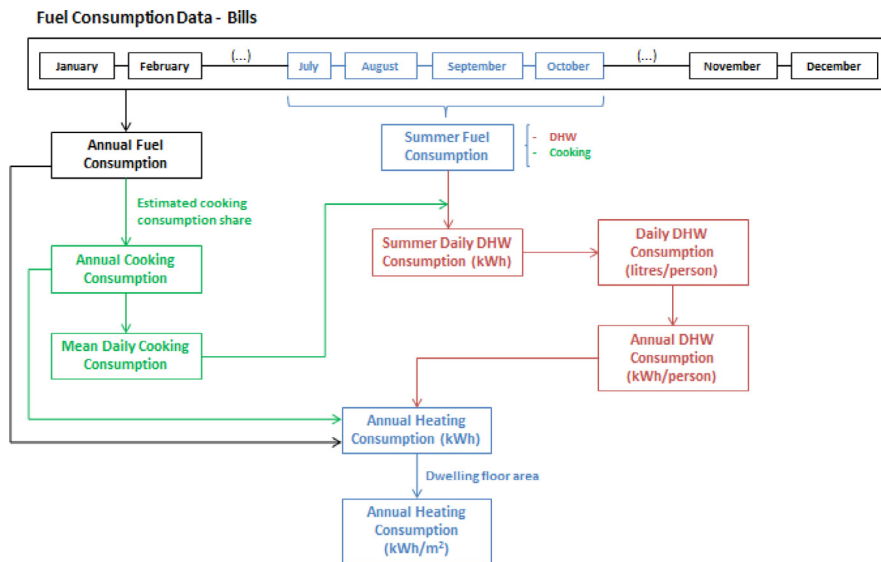


Fig. 8. Data analysis approach based on estimated DHW summer consumption.

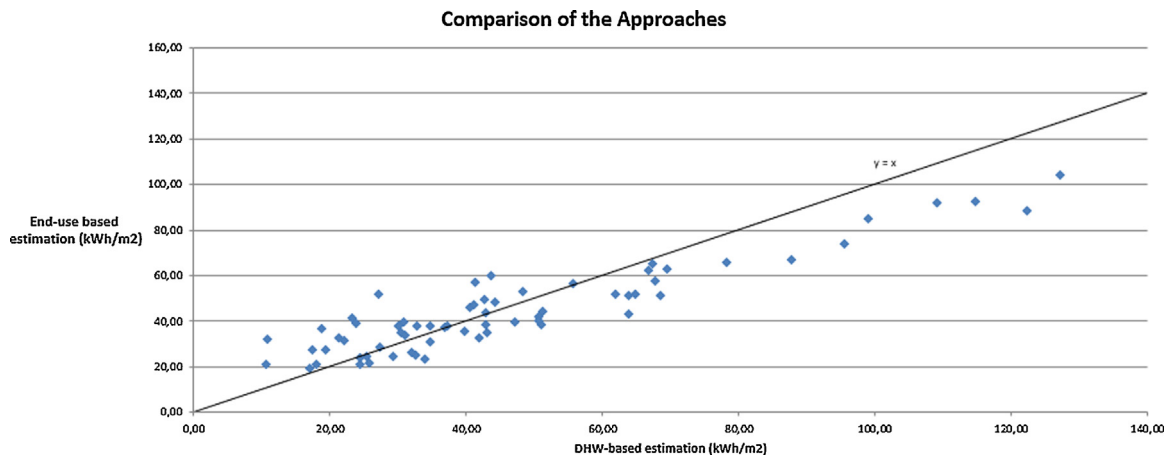


Fig. 9. Comparison of the annual space heating energy consumptions obtained with the two approaches.

Comparing the obtained normalised annual heating consumption values (kWh/m<sup>2</sup>), a fair consistency is verified between both approaches. Fig. 9 shows how the obtained values from each approach are very coherent, considering the underlying variability that actually exists behind average fuel distribution shares of Table 8. Nevertheless, it seems that in the cases of higher space heating demands, the DHW estimation approach underestimates the consumption referred to space heating in comparison with the end-use shares of Table 8.

### 3.3.3. Regression model

This section aims to obtain the space heating demand of different dwelling typologies through a bottom-up statistical regression approach. This method is based on real aggregated level consumption data, so its output constitutes an additional basis for the constructed models' validation.

The multiple linear regression is a statistic modelling technique used to adjust linear models between a dependant variable ( $y$ ) and more than one explanatory or independent variables ( $x_i$ ). The aim is to obtain  $b_i$  coefficients from an equation system consisting of  $j$  equations as Eq. (2).

$$y_j = b_0 + b_1 \cdot x_{1j} + b_2 \cdot x_{2j} + b_3 \cdot x_{3j} + \dots + b_n \cdot x_{nj} \quad (2)$$

Due to the lack of consumption data at postal code level, the regression approach is applied in a regional scale, by using municipal-level domestic consumption values from municipalities located in the Basque Country, around Bilbao. The implementation of Local Action Plans (LAPs), within the framework of Agenda 21 processes, has led to the measurement and publication of several sustainability indicators, which often include natural gas municipal consumption.

DHW and cooking average fuel use shares in Table 8 are discounted from the residential natural gas consumption, thus obtaining the domestic space heating natural gas consumption. To transform it into demand terms, mean seasonal efficiencies based on [51] are used, which are averaged for each municipality according to the heating systems and fuel distributions.

In order to extrapolate, municipality by municipality, the heating demand satisfied by natural gas into a total domestic heating demand, natural gas heated dwellings floor area's share is considered, over total municipal dwellings floor area [31].

This way, in this regression approach the dependant variables ( $y$ ) are the aggregated space heating demands of the different municipalities, normalised over the total dwelling stock floor area (kWh/m<sup>2</sup>). The  $x_i$  variables are the shares (%) of each dwelling typology's floor area, over the total stock floor area in each municipi-

**Table 9**  
Introduced dwelling typologies in the regression analysis.

|                              | Typology 1  | Typology 2 | Typology 3 |
|------------------------------|-------------|------------|------------|
| Building Construction Period | Before 1960 | 1960–1980  | 1981–2005  |

pality. The pursued  $b_1$  coefficients would therefore be the heating demands ( $\text{kWh/m}^2$ ) of each dwelling typology.

Municipalities with a population lower than 4000 inhabitants have been excluded from the analysis. Due to their lower amount of dwellings, it is considered that the lower accuracy of the statistical data could otherwise distort the application of the regression method. Totally, municipal residential natural gas consumption is obtained from 17 municipalities of the Basque Country. All of them are located in the same coastal climatic zone, so the consistency of the approach is ensured. Average municipal consumptions are obtained from the consumption values of different years within the 2005 – 2011 historical period, depending on the available information in each municipality.

Concerning dwelling typologies, it would be desirable the present regression analysis to include the same 17 representative dwelling types used to construct modelled archetype buildings. However, the dwelling breakdown detail level to be introduced in the analysis depends on the amount of available data, i.e. aggregated municipal consumption data. Therefore, a simplified classification must be performed. Due to the low share that the dwellings constructed after 2006 imply, they are excluded from the analysis. The rest of dwellings are classified into the three dwelling typologies shown in Table 9, based on their construction period. It is analysed the possibility of further distinguishing the dwellings according to their number of storeys, but the shares of 1 – 2 storeys buildings, which include single-family houses, are generally observed negligible. Ultimately, the number of the dwelling typologies introduced in the regression approach complies with the rule of thumb of ensuring a minimum ratio of five samples per each independent variable [52]. In this case, the ratio is 17:3.

### 3.3.4. Assessment of energy performance certificates

There is no doubt that the introduction of Energy Performance Certificates (EPCs) in the EU constitutes an interesting and extensive data source for energy policy planning purposes. Recent studies point to a wider spectrum of potential applications for EPCs data than originally intended, including the validation of building stock models [53]. Therefore, it is assessed the applicability of the EPCs as an additional source for building energy modelling results validation.

An EPCs registry is publicly available in the webpage of the Basque Government [54]. Instead of the complete EPCs,

the database provides the final energy efficiency label for each dwelling, which includes  $\text{CO}_2$  emissions and primary energy consumption values. According to dwellings energy certification procedure in Spain, those values correspond to the space heating, space cooling and DHW end-uses. Considering that cooling end-use could be considered negligible in Bilbao, a calculation procedure is set based on the application of the corresponding conversion factors, to estimate mean annual space heating consumption.

Totally 228 EPCs are analysed. The obtained mean annual space heating consumption is inconsistent with the rest of collected real data: it is significantly higher than the values assessed in the literature review and fuel consumption survey. Therefore, it seems that the current practice on EPCs drives to an overestimation of heating energy demand.

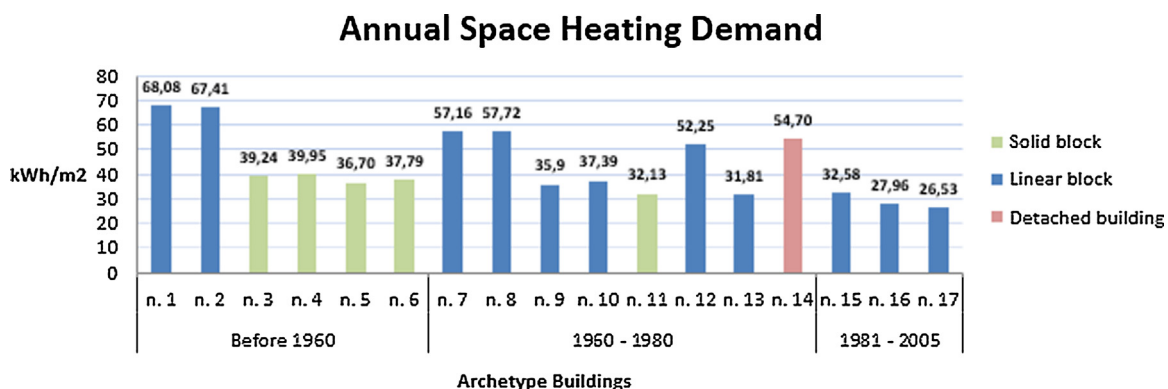
Such performance gap, i.e. the difference between estimated and actual energy performance, has been widely assessed in the literature [55–59]. In fact, there is a broad agreement that buildings with poor thermal performance tend to consume less than predicted in the EPCs [60–62], mainly due to the overestimation of factors usually set by standards and other assumptions used in EPC ratings [63–66]. Therefore, the possibility of building energy model's results validation through EPC databases is excluded from the proposed methodology.

## 4. Results

The constructed 17 archetype buildings models are simulated by Design Builder v.4.7.0.027 [47] software. Fig. 10 summarises the normalisation per heated floor area of the annual space heating demands of archetype buildings, presented per construction period and urban form.

The space heating demands show a correlation with the construction period and urban form. On the one hand, the evolution of constructive features tends to reduce the heating demand. For example, with the same urban form and similar building dimensions, but different façade composition, Arch. 7 ( $U = 1.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) and Arch. 15 ( $U = 0.63 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) show an annual heating demand 15% and 52% lower, respectively, than Arch. 2 ( $U = 1.77 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). On the other hand, due to the higher contiguity, buildings located in solid blocks present lower demands than the ones placed as linear blocks or detached buildings. For example, with the same facade composition and similar building dimensions, but different urban form, Arch. 1 (linear block) shows a heating demand 70% higher than Arch. 4 (solid block). In addition, the most recent buildings seem to be distinguished by a lower heating demand, thanks to the introduction of first energy regulations and related thermal insulation.

Section 3.2 above summarised the outputs of the depth assessment conducted to determine the model parameters which are



**Fig. 10.** Annual space heating demands of archetype buildings, by construction period and urban form.



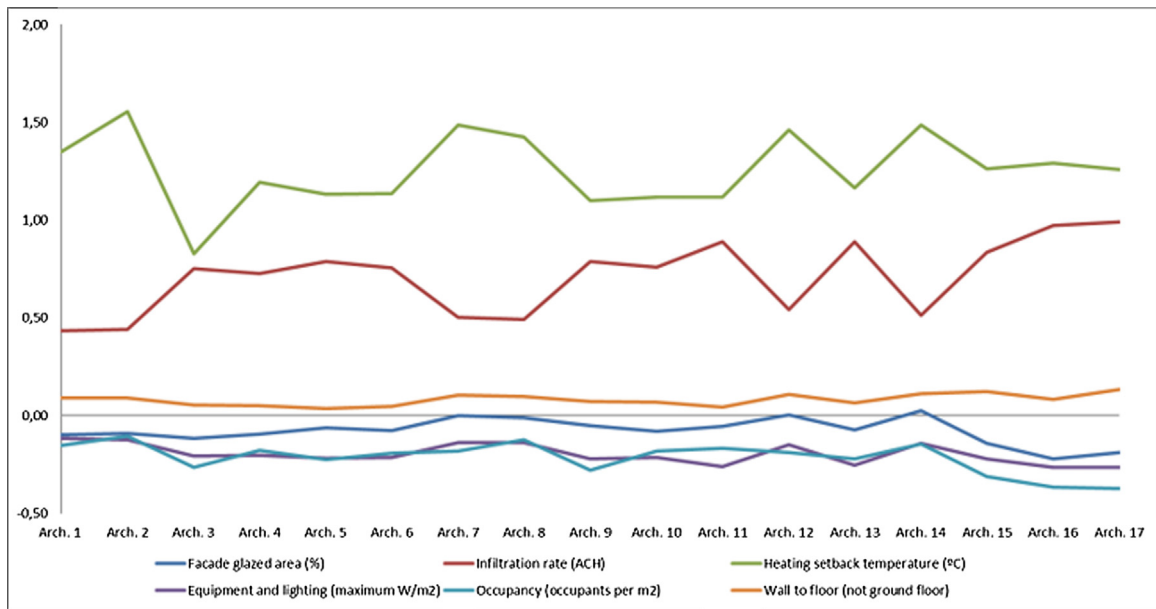


Fig. 11. Archetype buildings results' sensitivity to each input parameter.

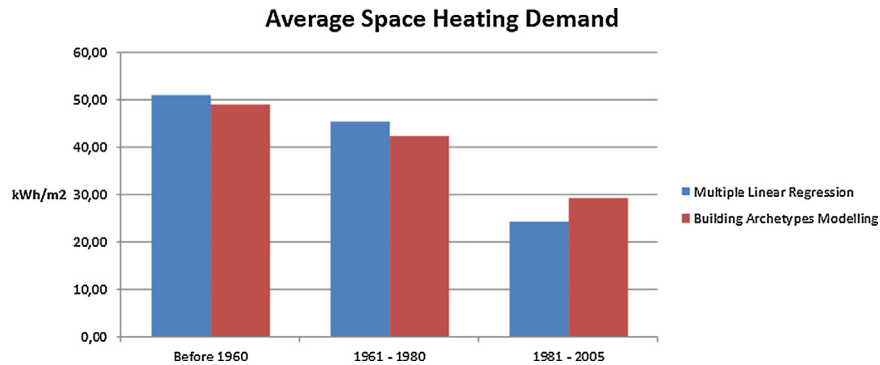


Fig. 12. Comparison between the modelled space heating demands, and the ones obtained from the regression.

Table 10  
Average of the normalised sensitivity coefficients for all archetype buildings.

| Average - All Archetype Buildings                  | Normalised sensitivity coefficient, $S_j$ |
|--|---|
| Facade glazed area (%)                             | -0.078                                    |
| Infiltration rate (ACH)                            | 0.704                                     |
| Heating setback temperature (°C)                   | 1.250                                     |
| Equipment and lighting (maximum W/m <sup>2</sup> ) | -0.196                                    |
| Occupancy (occupants per m <sup>2</sup> )          | -0.204                                    |
| $\Psi$ wall to floor thermal bridge                | 0.078                                     |

considered most influential. The results obtained in the present analysis support such assumption. Nevertheless, there are other input parameters which has not been such exhaustively assessed, either due to lack of available databases or because standards or regulation values have been applied. In order to analyse the effect of their uncertainty, the local sensitivity analysis [67] is conducted to obtain the normalised sensitivity coefficients, which represent the percentage change in the annual space heating demand of the models given a 1% change in the input parameter.

The analysed input parameters are the following: facade glazed area (%), infiltration rate, heating setback temperature, internal gains, occupancy and storeys' wall to floor thermal bridge's linear thermal transmittance. Table 10 shows the average of the normalised sensitivity coefficients for all archetype buildings, in relation to the space heating demand.

It is verified that the heating setback temperature represents, by far, the parameter which the results are more sensible to, followed by infiltration rate. In a much lower step, internal gains can be found, with a similar influence of equipment and lighting, and occupancy. Finally, the results sensitivity to facade glazed area and wall to floor thermal bridge  $\Psi$  value is very similar and negligible. Fig. 11 shows the described order of magnitude of the results sensitivity to each parameter, as well as the oscillation of normalised sensitivity coefficients depending on the archetype building. It is verified that the variability of the results due to these parameters, in their usual range, is notably less than that caused by the urban form, façade composition or the occupant behaviour.

Using a weighting factor for each modelled building archetype, based on its share over the total residential stock, an annual space heating demand of 43.08 kWh/m<sup>2</sup> is obtained on average, which is

**Table 11**  
Comparison of the annual heating energy consumption.

| Building Modelling Result | Fuel Consumption Survey<br>DHW estimation approach | End-use ratio approach   | Literature<br>SECH-SPAHOUSEC Atlantic Zone [48] |
|---------------------------|--|--------------------------|---|
| 49.58 kWh/m <sup>2</sup>  | 48.98 kWh/m <sup>2</sup>                           | 44.67 kWh/m <sup>2</sup> | 44 kWh/m <sup>2</sup>                           |

**Table 12**  
Comparison of Bilbao's residential heating energy demand.

|  |         |
|--|---------|
| Estimated Residential Space Heating Demand (MWh)Bilbao Average 2004 - 2017 | 461,584 |
| Building Modelling Result (MWh)  | 481,915 |

considered to correspond to a space heating energy consumption of 49.58 kWh/m<sup>2</sup> per year. A mean seasonal efficiency of 86.89% is estimated for Bilbao's space heating, based on [51] reference data, and considering the heating system distribution in Bilbao [31].

These results are compared to validation data obtained in Section 3.3. Table 11 shows that the resulting average space heating energy consumption is close to the values obtained from fuel consumption survey and literature: it is 1% above than the outcome of the survey considering the DHW-based approach and 10% above the survey output based on end-use ratio application approach.

On the other hand, focusing on a disaggregated level, Fig. 12 shows the comparison between the modelled space heating demands, averaged per construction period, and the demands obtained from the regression approach. The coefficient of determination was  $R^2 = 0.51$ , meaning a moderate adjustment. The model was globally significant with a p-value of 0.022, and all variables rejected the null hypothesis for an alpha value of 0.01. The assumption of independence of residuals was analysed through the Durbin-Watson test, obtaining a value of 2.16 that demonstrates the lack of autocorrelation. The assumptions of linearity and homoscedasticity were also verified through the scatter plot of residuals against predicted values. Comparing the regression results with the outputs from the archetype buildings modelling, the demand values corresponding to the construction period before 1960 and the *Developmentalism* period are very similar, being the modelled demand slightly higher in the case of post-1981 buildings.

Nevertheless, the obtained mean annual heating demand for modelled 1981 - 2005 archetype buildings, which is 29.38 kWh/m<sup>2</sup>, corresponds to an annual consumption of 33.81 kWh/m<sup>2</sup>, which is only 5% higher than the mean energy consumption (32.13 kWh/m<sup>2</sup>) of the complete set of 107 dwellings formed by the four real buildings used for occupant behaviour calibration. Therefore, the difference with the demand obtained from the regression approach may be caused by the limited number of samples introduced in such approach, which combined with the usual lower share of post-1981 buildings over the total stock, could drive to greater error in their result.

Finally, the results are analysed at an aggregated level. The Environmental Department of the City Council is contacted with the aim of collecting further information about the historical evolution of the residential natural gas consumption in Bilbao. Thanks to its collaboration, the full 2004–2017 historical consumption trend is completed, which is converted to residential space heating demand terms by applying the same assumptions described for regression.

The obtained disaggregated energy demand estimates are extrapolated to the whole residential stock by multiplying the results by the number of houses which fit the description of each building archetype. Table 12 shows that the obtained total space heating demand for Bilbao is very similar to the mean demand value derived from real consumption data of 2004–2017 period. The difference is only about 4%.

## 5. Conclusions

An appropriate energy characterisation of an existing building stock can help to implement the necessary energy efficiency policies in the most effective way. Recent improvements in geographical information systems have led to a rise in models developed for urban building stocks. Nevertheless, data availability on which they rely is not always available, and the sophistication of certain models could become a disadvantage for being replicable. At the same time, local authorities can constitute a significant bottom-up support in implementing the imperative energy saving policies. Aiming to contribute to such field, this paper describes an easy-to-implement methodology for the characterisation of residential heating energy consumption at city level. Particular attention has been given to its applicability, so the methodology lies on available public data sources and assumes real limitations of information tools availability. The method has been conceived to be applicable to any city, provided a primary understanding of the constructive evolution in the analysed geographical context.

The presented method lies on a bottom-up engineering approach, which often involves several challenges to deal with. This approach requires large amount of input information for model construction and validation processes. To contribute to data collection related difficulties, the introduced methodology proposes original ways of gathering further information, as benefitting from the content of fuel consumption invoices. Another weakness of this kind of approaches lies on the unpredictable nature of human behaviour, which can lead to important gaps between actual and modelled energy consumption. In the developed methodology, an empirical calibration procedure is proposed to construct occupant behaviour profiles, based on real consumption data from buildings with communal heating systems.

The lack of transparency regarding other model inputs-related assumptions based on author's experience, as well as the common utilisation of standard values for certain input parameters, often lead the model outputs to lack credibility if rigorous validation is not performed. In the described methodology important focus is given to the process of verifying models results, by collecting real data for an evidence-based testing. Validation methods, at both disaggregated and aggregated level, allow the reliability of the results to be ensured. A multiple linear regression approach is also proposed, applied at a regional scale instead of the usual postal code level. In addition, sensitivity analysis helps to delimit the influence of subjective assumptions.

The described method was implemented for the residential building stock of Bilbao, where a total of 17 representative buildings were identified. The results constitute a data set which is significantly aligned with gathered real consumption information. Applying the methodology to Bilbao demonstrates that the proposed method can accurately reproduce the existing heating energy consumption, providing a good estimate of the thermal performance of the residential stock. The implementation of the presented procedure provides an aggregated heating energy demand that only

differs around 4% from real historical data which, being in the order of magnitude of the differences achieved in other analyses [10,14,25,32,58], is considered successful.

Accurate modelling of buildings energy demand constitutes a key tool to assist energy retrofitting policies. The outcome of this study provides Bilbao's baseline energy consumption estimation, disaggregated per building type, forming a basis for further investigations aimed at exploring the economic effects of different energy efficiency strategies, identifying cost-optimal sets of measures per building type and estimating the required investment for the achievement of different energy targets. This research is currently being conducted and the authors expect to publish its results soon.

In building stocks modelling through archetype buildings, one of the challenges is to find a limited number of essential building parameters as segmentation criteria, which permit to maintain a reasonable computational time. The results show that energy consumption variation between buildings in different urban morphologies can be much larger than the differences caused by the varying facade solutions due to different construction periods. The urban forms have a significant impact on the energy performance of a building, and that is why it is crucial to include, within segmentation criteria of Phase 1, parameters that could indirectly be related with different urban morphologies, such as building height and dwelling floor area. The outlines of such relation must be search within the historical evolution of a city and the development of the different architectural styles.

Although the application of the presented methodology is verified completely feasible with existing data sources, there are some limitations related to the lack of sufficient databases that make it more arduous its implementation. As it is broadly mentioned in the literature [22,26] there is room for improvement in the development of the existing building stock features databases, as well as in the knowledge of domestic energy consumption characteristics. Furthermore, a great potential exists for IEEs to become an important data source for building energy modelling.

The applicability of Energy Performance Certificates (EPCs) is also evaluated as an additional way for validation of building energy modelling results. Nevertheless, it seems that the current practice on EPCs drives to an overestimation of heating energy demand, which is aligned with outcomes of other studies [55,57,61]. Therefore, the possibility of building energy model's results validation through EPC databases is excluded from the proposed methodology

Nevertheless, the results demonstrate the practicability of characterising the heating energy consumption of a city-scale residential building stock with available data sources, aiming to provide a basis for the investigation of energy savings potential and related CO<sub>2</sub> emission reductions.

### Declaration of Competing Interest

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

### CRedit authorship contribution statement

**Jon Fernandez:** Methodology, Investigation, Data curation, Writing - review & editing. **Luis del Portillo:** Conceptualization, Supervision. **Iván Flores:** Resources, Validation, Visualization.

### Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the natural gas consumption data provided by the Environmental Department of the City Council of Bilbao. This research did not receive any specific

grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

### References

- [1] International Energy Agency. CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion. Highlights. 2017.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Global Warming of 1.5 °C. Summary for Policymakers. 2018.
- [3] European Commission (EC). Energy Roadmap 2050 [COM/2011/885]. 2011.
- [4] European Commission (EC). A Clean Planet for All. A European Strategic Long-Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy. 2018.
- [5] European Commission (EC). Energy performance of buildings directive (2019) [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive> [accessed 15.01.2019].
- [6] O. Pombo, B. Rivela, J. Neila, The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook, *J. Clean. Prod.* 123 (2016) 88–100.
- [7] L.G. Swan, I. Ugursal, Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: a review of modeling techniques, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (2009) 1819–1835.
- [8] M. Kavcic, A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic, M. Djurovic-Petrovic, A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector, *Build. Environ.* 45 (2010) 1683–1697.
- [9] N. Ghiassi, A. Mahdavi, Reductive bottom-up urban energy computing supported by multivariate cluster analysis, *Energy Build.* 144 (2017) 372–386.
- [10] C. Nageli, C. Camarasa, M. Jakob, G. Catenazzi, Y. Ostermeyer, Synthetic building stocks as a way to assess the energy demand and greenhouse gas emissions of national building stocks, *Energy Build.* 173 (2018) 443–460.
- [11] C.S. Monteiro, A. Pina, C. Cerezo, C. Reinhart, P. Ferrao, The use of multi-detail building archetypes in urban energy modelling, *Energy Procedia* 111 (2017) 817–825.
- [12] I. Ballarini, S.P. Corgnati, V. Corrado, Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: the experience of TABULA project, *Energy Policy* 68 (2014) 273–284.
- [13] Official Journal of the European Union. Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and buildings elements (2012/C 115/01). 2012.
- [14] E. Mata, A. Sasic Kalagasidis, F. Johnsson, Building-stock aggregation through archetype buildings: France, Germany, Spain and the UK, *Build. Environ.* 81 (2014) 270–282.
- [15] I. Sartori, N.H. Sanberg, H. Bratebo, Dynamic building stock modeling: general algorithm and exemplification for Norway, *Energy Build.* 132 (2016) 13–25.
- [16] M. Gangolelli, M. Casals, N. Forcada, M. Macarulla, E. Cueva, Energy mapping of existing building stock in Spain, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 3895–3904.
- [17] K.N. Streicher, P. Padey, D. Parra, M.C. Burer, S. Schneider, M.K. Patel, Analysis of space heating demand in the Swiss residential building stock: element-based bottom-up model of archetype buildings, *Energy Build.* 184 (2019) 300–322.
- [18] Intelligent Energy Europe Project "EPISCOPE" (2012 - 2016) [online]. Available: <http://episclope.eu> [accessed 21.09.2019].
- [19] Covenant of Mayors for Climate & Energy. Covenant initiative (2008) [Online]. Available: <https://www.covenantofmayors.eu/about/covenant-initiative/origins-and-development> [accessed 15.01.2019].
- [20] M. Österbring, E. Mata, L. Thuvander, M. Mangold, F. Johnsson, H. Wallbaum, A differentiated description of building stocks for a georeferenced urban bottom-up building stock model, *Energy Build.* 120 (2016) 78–84.
- [21] C.F. Reinhart, C. Cerezo Davila, Urban building energy modelling – a review of a nascent field, *Build. Environ.* 97 (2016) 196–202.
- [22] T. Hong, Y. Chen, X. Luo, N. Luo, S.H. Lee, Ten questions on urban building energy modelling, *Build. Environ.* 168 (2020) 106508.
- [23] C. Cerezo Davila, C.F. Reinhart, J.L. Bemis, Modelling Boston: a workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets, *Energy* 117 (2016) 237–250.
- [24] M. Braulio-Gonzalo, P. Juan, M.D. Bovea, M.J. Rua, Modelling energy efficiency performance of residential building stocks based on Bayesian statistical inference, *Environ. Model. Softw.* 83 (2016) 198–211.
- [25] V. D'alonzo, A. Novelli, R. Vaccaro, D. Vettorato, R. Albatici, C. Diamantini, P. Zambelli, A bottom-up spatially explicit methodology to estimate the space heating demand of the building stock at regional scale, *Energy Build.* 206 (2020) 109581.
- [26] Y. Chen, T. Hong, X. Luo, B. Hooper, Development of city buildings dataset for urban building energy modelling, *Energy Build.* 183 (2019) 252–265.
- [27] R. Buffat, A. Froemelt, N. Heeren, M. Raubal, S. Hellweg, Big data GIS analysis for novel approaches in building stock modelling, *Appl. Energy* 208 (2017) 277–290.
- [28] L. Frayssinet, L. Merlier, F. Kuznik, J.L. Hubert, M. Milliez, J.J. Roux, Modelling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 (2018) 2318–2327.

- [29] G. Happle, J.A. Fonseca, A. Schlueter, A review on occupant behaviour in urban building energy models, *Energy Build.* 174 (2018) 276–292.
- [30] J. Fernandez, L. Del Portillo, I. Flores, P. Hernandez, Assessing residential heating energy consumption in a city-scale: a bottom-up methodological approach, in: *Proceedings of the XI National and II International Engineering Thermodynamics Congress, 11CNIT, 2019*, pp. 122–133. *Proceedings book*.
- [31] INE (Spanish National Institute of Statistics). Population and Housing Census (2011) [Online]. Available: <https://www.ine.es/censos2011/tablas/Inicio.do> [accessed 18.01.2019].
- [32] A. Mastrucci, O. Baume, F. Stazi, U. Leopold, Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city: a GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam, *Energy Build.* 75 (2014) 358–367.
- [33] B. Howard, L. Parshall, J. Thompson, S. Hammer, J. Dickinson, V. Modi, Spatial distribution of urban building energy consumption by end use, *Energy Build.* 45 (2012) 141–151.
- [34] Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 2429/79, de 6 de Julio, Por el que se Aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, Sobre Condiciones Térmicas en los Edificios. 1979.
- [35] MITYC. Código Técnico de la Edificación, 2006.
- [36] J.P. Gouveia, P. Fortes, J. Seixas, Projections of energy services demand for residential buildings: insights from a bottom-up methodology, *Energy* 47 (2012) 430–442.
- [37] R. Mckenna, E. Merkel, D. Fehrenbach, S. Mehne, W. Fichtner, Energy efficiency in the German residential sector: a bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets, *Build. Environ.* 62 (2013) 77–88.
- [38] INE (Spanish National Institute of Statistics). Population and Housing Census (2001) [Online]. Available: <http://www.ine.es/censo/es/inicio.jsp> [accessed 18.01.2019].
- [39] AEMET. Atlas de Radiación Solar en España Utilizando Datos del SAF de Clima de EUMETSAT. 2012.
- [40] Nieves Basurto Ferro. Los Maestros de Obras en la Construcción de la Ciudad: Bilbao, 1876–1910. 1999.
- [41] Eraikl Program. GUÍA AZALA: Rehabilitación Energética Integral de la Envolvente de los Edificios en Euskadi. 2015. Available: [http://www.garraioak.ejgv.euskadi.eus/r41-18971/es/contenidos/informacion/guia\\_azala/es\\_def/index.shtml](http://www.garraioak.ejgv.euskadi.eus/r41-18971/es/contenidos/informacion/guia_azala/es_def/index.shtml) [accessed 09.06.2019].
- [42] Departamento de Empleo y Políticas Sociales del Gobierno Vasco. Dirección de Vivienda. Catálogo de Rehabilitación Energética. 2014.
- [43] I. Lizundia, La Construcción de la Arquitectura Residencial en Gipuzkoa Durante la Época del Desarrollismo, Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea, 2012.
- [44] Boletín Oficial del Estado. Ley 8/2013, de 26 de Junio, de Rehabilitación, Regeneración y Renovación Urbanas. 2013.
- [45] Boletín Oficial del Estado. Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de Octubre, Por el Que se Aprueba el Texto Refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana. October 2015.
- [46] Official Journal of the European Union. Directive 2012/27/UE. 2012.
- [47] DesignBuilder simulation tool. 2020 DesignBuilder Software Ltd, UK. Available online: <https://designbuilder.co.uk>.
- [48] IDAE. Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del Consumo Energético del Sector Residencial en España. 2011.
- [49] EVE. Claves Energéticas del Sector Doméstico en Euskadi. 2013.
- [50] M.F. Triola, Estadística. 2009.
- [51] IDAE. Escala de Calificación Energética. Edificios Existentes. 2011.
- [52] J.F. Hair, R.L. Taham, R.E. Anderson, A.W. Black, *Multivariate Data Analysis*. 1999.
- [53] O. Pasichnyi, J. Wallin, O. Kordas, Data-driven building archetypes for urban building energy modelling, *Energy* 181 (2019) 360–377.
- [54] Departamento de Desarrollo Económico e Infraestructuras (2020). Certificado de eficiencia energética. Available: <https://www.euskadi.eus/certificado-eficiencia-energetica/web01-a2indust/es/> [accessed 14.03.2019]
- [55] D. Majcen, L.C.M. Itard, H. Visscher, Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: discrepancies and policy implications, *Energy Policy* 54 (2013) 125–136.
- [56] P. De Wilde, The gap between predicted and measured energy performance of buildings: a framework for investigation, *Autom. Constr.* 41 (2014) 40–49.
- [57] B. Harsman, Z. Daghbashyan, P. Chaudhary, On the quality and impact of residential energy performance certificates, *Energy Build.* 133 (2016) 711–723.
- [58] C. Balaras, E.G. Dascalaki, K.G. Droutsas, S. Kontoyiannidis, Empirical assessment of calculated and actual heating energy use in Hellenic residential buildings, *Appl. Energy* 164 (2016) 115–132.
- [59] S. Cozza, J. Chambers, M.K. Patel, Measuring the thermal energy performance gap of labelled residential buildings in Switzerland, *Energy Policy* 137 (2019) 111085 Available online.
- [60] H. Hens, W. Parijs, M. Deurinck, Energy consumption for heating and rebound effects, *Energy Build.* 42 (2010) 105–110.
- [61] S. Kelly, D. Crwaford-Brown, M.G. Pollit, Building performance evaluation and certification in the UK: is SAP fit for purpose? *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 6861–6878.
- [62] D. Majcen, L. Itard, H. Visscher, Actual heating energy savings in thermally renovated Dutch dwellings, *Energy Policy* 97 (2016) 82–92.
- [63] E. Burman, D. Mumovic, J. Kimpian, Towards measurement and verification of energy performance under the framework of the European directive for energy performance of buildings, *Energy* 77 (2014) 153–163.
- [64] C. Hoffmann, A. Geissler, The rebound-effect in detail: real indoor temperatures in basements and measured versus calculated U-values, *Energy Procedia* 122 (2017) 32–37.
- [65] J. Kragh, J. Rose, H.N. Knudsen, O.M. Jensen, Possible explanations for the gap between calculated and measured energy consumption of new houses, *Energy Procedia* 132 (2017) 69–74.
- [66] A.J. Summerfield, T. Oreszczyn, J. Palmer, I.G. Hamilton, F.G.N. Li, J. Crawley, R.J. Lowe, What do empirical findings reveal about modelled energy demand and energy ratings? Comparisons of gas consumption across the English residential sector, *Energy Policy* 129 (2019) 997–1007.
- [67] S.K. Firth, K.J. Lomas, A.J. Wright, Targeting household energy efficiency measures using sensitivity analysis, *Build. Res. Inf.* 38 (2010) 25–41.

## 2. Artikulua

FERNANDEZ, J.; FLORES, I.; DEL PORTILLO, L. Identification of cost-optimal levels for energy refurbishment of a residential building stock under different scenarios: Application at the urban scale, Energy & Buildings, 2021, vol. 240, 110880.

**DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110880>

**Aldizkaria:** Energy and Buildings

**ISSN:** 0378-7788

**Kalitateko adierazleak (2021):**

- Eragin faktorea: 7,201
- Journal Citation Indicator-aren (JCI) arabera sailkapena:

| Kategoria                          | JCI Rank | JCI Quartile | JCI Percentile |
|------------------------------------|----------|--------------|----------------|
| Construction & Building Technology | 12/89    | Q1           | 87,08          |
| Energy & Fuels                     | 26/145   | Q1           | 82,41          |
| Engineering, civil                 | 21/175   | Q1           | 88,29          |

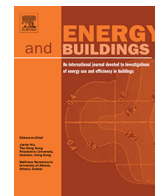
eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Bizitegi-parkeen birgaitze energetikorako ikuspegi  
integrala: Bilboko kasua**



# Identification of cost-optimal levels for energy refurbishment of a residential building stock under different scenarios: Application at the urban scale



Jon Fernandez-Luzuriaga\*, Luis del Portillo-Valdes, Iván Flores-Abascal

*ENEDI Research Group. University of the Basque Country, Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain*

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 4 December 2020

Revised 23 February 2021

Accepted 1 March 2021

Available online 9 March 2021

### Keywords:

Cost-optimal analysis

Energy retrofit

Residential stock

nZEB

Global cost

Payback period

## ABSTRACT

The low replacement rate of existing residential buildings, together with their high share in the final energy consumption, has put energy refurbishment of the current stock in the centre of the agenda. Nevertheless, due to the high up-front investment and long payback period that it usually implies, deep energy retrofitting is not yet widely applied. In this context, the cost-optimal methodology introduced by Directive 2010/31/EU created a framework to identify the energy efficiency measures that would maximize the economic return. However, the analysis of cost-optimality has often been limited to a single building or type of building, which cannot be extrapolated to an existing building stock. In other cases, the limited number of reference buildings hinders the capture of the great heterogeneity of an existing building stock into sufficiently homogeneous building typologies for a reliable extrapolation of the assessment results. To address such a challenge, this research proposes the application of the cost-optimal method on an urban scale, aiming to identify the suitable range of energy performance that is reasonable to promote in different types of buildings, keeping in mind their specific characteristics. The methodology is applied to the residential building stock of the city of Bilbao, northern Spain, through a comprehensive approach that also incorporates deeper interventions pointing at nearly zero-energy building levels. The results aim to support decision-makers in outlining the most suitable energy efficiency policy and determining the priority targets that demand the mobilisation of investment.

© 2021 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

### 1.1. Context

In the European Union (EU), buildings are responsible for 40% of the final energy (FE) consumption and cause 36% of the greenhouse gas (GHG) emissions [1], which turns them into a sector of strategic importance within the ambitious European energy policy towards 2050 [2,3]. In Spain, 18.3% of the final energy demand corresponds to residential buildings [4].

The low replacement rate of existing buildings – about 1–3% per year in EU countries [5] – means that most buildings in existence in 2050 have already been built. In this context, the energy refurbishment of existing buildings becomes imperative to reduce energy consumption and related GHG emissions, and has thus been put in the centre of the political agenda.

Numerous methods and tools have been proposed to assess and compare different energy saving measures. [6–9] provide comprehensive reviews of the extensive research in the field of building energy retrofitting. Nevertheless, the energy retrofit rate remains scarce, leading to a slow diffusion of energy efficient technologies. Furthermore, this refurbishment is often limited to a single element retrofit measure, either because of its quick investment return, as in the case of lighting replacement, or due to the expiry of an element's lifetime, such as the replacement of the heating system.

Yet, a significant investment gap exists in deep energy retrofitting, beyond the minimum indispensable maintenance repairs, mainly due to the high up-front investment and long payback period (PBP) that it usually implies. The practice has proven that these two are the most relevant parameters in the evaluation of a major building energy refurbishment [10,11]. Also, in Spain, financing is identified as the main barrier faced by refurbishment projects, in a framework of lower solvency of households due to the effects of the economic crisis [12]. A reasonable investment PBP, through trusted energy cost savings, is indispensable to motivate owners to

\* Corresponding author.

E-mail address: [jfernandez164@ikasle.ehu.es](mailto:jfernandez164@ikasle.ehu.es) (J. Fernandez-Luzuriaga).

carry out such a great financial effort. It is therefore crucial to reliably identify the retrofit measures that would maximize the economic return.

In this context, Directive 2010/31/EU (EPBD recast) [13] aimed to create a framework for long-term improvements in the energy performance of buildings, by promoting cost-effective energy refurbishments. For the first time, the EPBD recast introduced the cost-optimal methodology: an assessment that allows different levels of energy intervention to be compared under distinct macroeconomic scenarios, aiming to identify the long-term cost-optimal energy performance level, i.e. the level that leads to the lowest cost during the estimated economic lifecycle (hereinafter cost-optimal level).

Supplementing the EPBD recast, the Commission Delegated Regulation No. 244/2012 [14] and the Guidelines that accompany it [15] were published in 2012. This further developed the harmonized methodology for calculating buildings' cost-optimal levels. The methodology is based on the net present value approach. The term global cost (GC), taken from the standard EN 15459, corresponds to what in the literature is generally called lifecycle cost. Therefore, it includes not only the up-front investment, but also additional such costs as operational, maintenance, disposal and energy saving costs. Thus, the framework incorporates a holistic lifecycle approach, and is not limited to short-term optimizations. Nevertheless, unlike the life cycle assessment (LCA), it excludes the environmental impacts of grey energy.

The starting point of the methodology is the set of reference buildings (RBs) that should faithfully represent an entire building stock. At the beginning of the process, some energy efficiency measures (EEMs) are defined, and then combined in packages of measures (variants) to be applied to the RBs. Afterwards, the calculation splits into two parts: the calculation of the energy performance and that of the economic performance of the different combinations of RBs and variants. The objective of the former is to determine the annual overall energy use in terms of primary energy (PE). That of the latter is fed by the results of the former. Thus, a cost curve could be derived showing the assessed scenarios of energy performance (PE consumption, in the x-axis) and financial performance (GC, in the y-axis). The best retrofit solutions can be found in the lower part of the curve.

On the other hand, the EPBD recast also introduced the nearly-zero energy building (nZEB) concept, which refers to a building with a very high energy performance that uses renewable sources to largely cover the low amount of required energy. The EPBD recast required the Member States to determine a national indicator of primary energy use for nZEBs and to guarantee all new buildings are erected in those terms by December 31, 2020. In Spain, the applicable definition of nZEB is included in the Building Technical Code regulation (CTE DB HE), which was updated in December 2019 [16].

## 1.2. Literature review

The EPBD recast requests the EU Member States (MS) to periodically calculate and report national cost-optimal levels, in order to compare them with the minimum energy performance requirements set in national building regulations. Since it is not possible to assess the cost-optimality for every single building, EPBD recast demands MS to define at least two RBs for each category of existing buildings. Accordingly, Spain defined two single-family RBs and two multi-family RBs [17]. Besides these reports, delivered by all the European governments, there are also many additional studies which focused on the cost-optimal retrofits of national building stocks [18–21].

Nevertheless, like other national building stocks, the Spanish one is very diverse in terms of building styles and usage. For

instance, construction technologies are substantially influenced by local climatic conditions, which also determine the distribution of the final energy consumption into different end-uses. Considering the great heterogeneity of the existing residential buildings, the question is straightforward: is such a small number of RBs actually representative of a national building stock? An elementary assumption for the usefulness of the methodology is the consideration that the results achieved for certain RBs could be reliably extended to the rest of the buildings of the same typology. If the number of RBs is not enough to classify a large building stock into sufficiently uniform and homogeneous building typologies, no extrapolation of the assessment results is possible at the entire building stock level. Thus, some authors have wondered whether the cost-optimal procedure ensures credible results for all the buildings within a specific category [22]. A suitable identification of RBs is therefore fundamental to faithfully reflect an existing building stock and ensure the representativeness of the analysis results.

On the other hand, a substantial number of studies consider only one specific building typology among all the stock. Kuusk et al. assessed 1960–1990 Estonian brick apartment buildings [23]. Corrado et al. analysed an Italian 1946–1960 apartment block [24]. Saglam et al. focused on Turkish high-rise apartment blocks [25]. Niemela et al. addressed 1960–1990 large panel-structured apartment buildings in Finland [26]. Carpino et al. identified cost-optimal energy interventions in Italian social housing of the 1960s–1970s [27]. In addition, many analyses have been performed at a single building level, as a specific case study in which a high quantity of data is available. Kumbaroglu and Madlener assessed an existing building in Aachen [28]. Becchio et al. examined a building in Turin [29]. De Angelis et al. analysed a social housing apartment block in Brescia [30]. Ferrara et al. applied the cost-optimal method to a two-floor residential building in Ambérieu-en-Bugey [31]. Guardigli et al. studied three real buildings in Bologna [11]. La Fleur et al. evaluated a multifamily building in Linköping [32]. However, although the targeted buildings are usually emblematic, none of these approaches permits the entire building stock to be handled as a whole, allowing the economic costs associated with the renovation of each building typology over long-time horizons to be estimated and compared. The latter is fundamental to help decision making in energy policy planning.

Looking at city level, few comprehensive analyses have still been presented from an urban perspective. A limited number of studies assess the urban scale from the perspective of commercial buildings [33], but methods which focus on city-level residential building stocks' retrofitting are scanty. Delmastro et al. described a novel methodology to identify cost-optimal energy retrofits for residential buildings at city level, although the presented case study was limited to a district of Torino [34]. Likewise, Liu et al. investigated the cost-optimal refurbishment strategies for a medieval district in Visby (Sweden) [35]. More recently, Martinez-Garriga et al. presented an interesting case study in Barcelona [36], but it focused on the achievement of carbon neutrality through the implementation of renewable energies, not on cost-optimal levels, and it relied on only three prototypical residential buildings. Ali et al. described a worthwhile method to optimize urban-scale energy refurbishment decision for residential buildings and applied it to the residential building stock in Dublin [37]. Nevertheless, the study relies on the energy consumption data from the Energy Performance Certificates database, which often involves a large gap with the actual energy use, and classifies the different buildings into groups on the basis of their respective energy ratings using simple aggregation, thus limiting the number of building characteristics that can be represented by each building archetype. All in all, there is still a need for further cost-optimal energy refurbishment investigation, from a sufficiently close



perspective as to allow the great heterogeneity of an existing large building stock to be entirely captured.

Among the research studies on the energy retrofitting of existing residential buildings, passive strategies are the most commonly addressed measures [7], and there are only a limited number of studies which combine passive strategies, intervention on a building's active systems and renewable energy technologies at the same time [38–40]. Nevertheless, nZEB targets would only be reached by adding renewable energy systems that could, beyond the savings achievable through conventional retrofits, partially cover the remaining energy consumption. Although the current practice is still far from a large-scale transformation of existing buildings into nZEBs, nZEB targets should also be included in the analysis, which allows an assessment of the distance between a cost-optimal performance and the nZEB level, addresses the economic viability of the latter and evaluates suitable measures that could encourage the long-term transition to nZEBs. Therefore, it is clear that a comprehensive approach requires the consideration of the whole energy efficiency range, from minor measures up to major renovations pointing to nZEB levels.

Looking at the whole workflow adopted in different studies [18], identified two main different methods when applying the cost-optimal methodology: simplified and complex. On the one hand, simplified methods [24,41] propose a simple way to approximate the energy demand, such as the Degree Days approach, and assume a certain level of uncertainty in the results. On the other hand, complex methods are based on simulations that account for the dynamics of a building to more accurately estimate its energy needs [42,43].

### 1.3. Approach

In summary, the authors believe that cost-optimality has scarcely been analysed on a scale which could allow an extensive consideration of the climatic conditions, energy usage and constructive features distinctive to a specific building stock. It demands combining a scale lower than a national stock with an adequate number of RBs. Attempting to address this aspect, this research proposes the application of the cost-optimal methodology at the urban scale, in order to provide a set of tailored technical solutions and identify the suitable range of energy performance that can reasonably be promoted, keeping in mind the specific characteristics of the different types of residential buildings.

The paper describes a comprehensive approach that goes beyond identifying the cost-optimal interventions and also incorporates deeper energy efficiency measures that could allow nZEB levels to be reached. In addition, energy performance assessments are carried out with a dynamic simulation software. The analysis is performed for the city of Bilbao, investigating the most effective energy efficiency measures that could be applied to the existing residential building stock under different scenarios. Nevertheless, similar data are often available, so the approach is easily replicable for any other urban context.

This work aims to support urban energy planning decision-makers in identifying the most suitable long-term policy for the retrofitting of the existing residential stock. The conducted research helps, through the exploration of multiple refurbishment scenarios, to evaluate the cost-effective range of interventions that could be promoted by policy makers.

The outputs of the study allow different types of analyses:

- Diagnosis of the set of optimal technical solutions for the energy retrofitting of the existing building stock.
- Quantification of energy saving and CO<sub>2</sub> emission reduction potential.

- Assessment of the current distance between the cost-optimal performance and nZEB targets.
- Evaluation of the level at which fiscal policies or incentives can be targeted in each building type.

Ultimately, this knowledge will support the implementation of an energy efficiency policy through the identification of energy refurbishments that should be prioritized by economic support schemes, aiming to ensure an optimal exploitation of the public financial resources.

## 2. Methodology

The comprehensive approach developed in this study is based on the adaptation of the cost-optimal methodology to local conditions. It focuses on space heating and domestic hot water (DHW) end-uses, which represent the greatest share of the residential energy consumption in the climatic zone where the city of Bilbao is located [44]. On the one hand, the cooling demand in such climatic area is negligible. On the other hand, the study excludes the energy savings related to the improvement in domestic appliances and lights, as it is assumed that their replacement would inevitably occur in the coming years.

The PE consumption calculation of the cost-optimal methodology, which is based on [15], excludes the renewable energy produced by a building and only considers the PE associated with the delivered energy. Nevertheless, the maximum PE consumption set by the CTE DB HE does include the PE related to the renewable energy generated on-site. Due to this mismatch, these values are not comparable. Therefore, in order to compare the outputs from the cost-optimal methodology with the PE thresholds set by the Spanish regulation in force, the non-renewable PE (nr-PE) consumption must be used within the calculation of the cost-optimal levels, for which the CTE also defines specific limit values. For the climatic zone where Bilbao is located, the CTE DB HE establishes a nr-PE limit of 32 kWh/m<sup>2</sup>·year for new – nZEB – buildings.

A flowchart representing the whole process is provided in Fig. 1. The analysed RBs are conformed by the 17 building archetypes constructed by [45]. For each building archetype, two RBs are defined, each one with a different space heating and DHW production system. Thus, the cost-optimal methodology is applied to a total of 34 RBs. The detailed dynamic simulation software Design Builder v.6 [46] is used to calculate the space heating energy demands of the different retrofitted scenarios of RBs. The energy demand calculations are made referring to the same reference occupant behaviour. The computation of final energy use is obtained by applying the mean seasonal efficiency of the corresponding system. Likewise, calculations for renewable energy systems are carried out using System Advisor Model (SAM) v2020.2.29 software [47], whose outcome is subtracted from the final energy consumption before applying the corresponding conversion factors to nr-PE and CO<sub>2</sub> emissions. Finally, GC calculations are performed in an Excel environment, for both end-user's private (microeconomic) and macroeconomic perspectives. In addition, the discounted PBP parameter is also calculated for each package of measures, using the energy savings as a cashflow to recover the initial investment.

Although energy and CO<sub>2</sub> savings, together with associated economic advantages, constitute the core of an energy efficiency policy, energy refurbishment also involves further benefits. Some of them, such as increased thermal comfort and associated human health, could be difficult to monetise. There are also social targets such as the eradication of fuel poverty that can be achieved through energy retrofitting. Furthermore, although in some

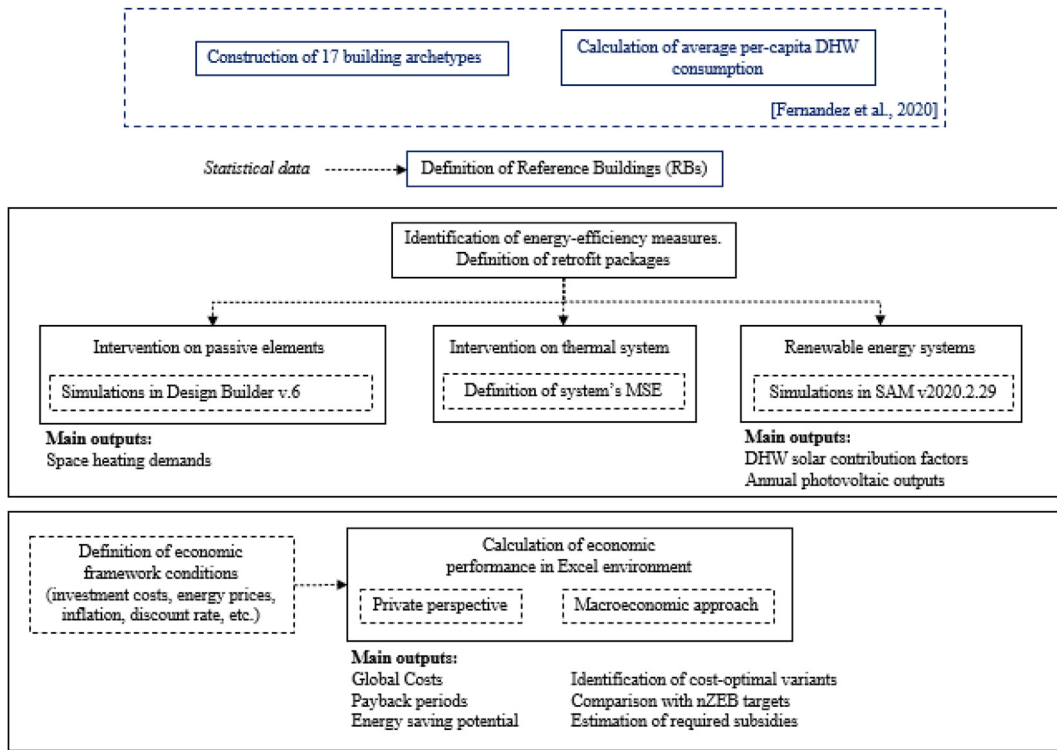


Fig. 1. Summary flowchart of the process.

locations there is not sufficient evidence yet to precisely quantify it, the market value of an energy efficient house undoubtedly increases. Therefore, it must be borne in mind that the present cost-optimal method does not entirely comprise all the benefits of energy retrofitting.

## 2.1. Definition of reference buildings

### 2.1.1. Building archetypes

The geometries of RBs are based on the 17 building archetypes constructed in a previous work [45], whose relevant features are summarized in Table 1. Those building archetypes represent 87.90% of the total residential stock of Bilbao. Each building archetype is constituted by a representative dwelling (RD) with specific features, for which Spanish INE statistics are available.

Nevertheless, no active system was defined for each building archetype. Therefore, a specific thermal system must be defined for each building to which the cost-optimal methodology is applied. According to the Basque Energy Agency (EVE) [48], in the Basque Country, it is usual for the DHW system to be associated with the space heating system, so dwellings with either collective or individual heating systems usually use the same scheme to supply DHW. A similar conclusion can be derived from the results of the SPAHOUSEC II project [49] for the Atlantic climatic zone. Thus, the present study assumes that the DHW production system is the same as the heating system in all simulated homes, so it is determined according to the available statistics on the distribution of the latter. On the one hand, the 2011 Population and Housing Census provided the distribution of the heating systems of Bilbao's dwellings into collective systems, individual systems and independent heating devices [50], but did not contain the fuel distribution of such systems anymore. To get it, the previous Census, from 2001, must be explored [51], which distributes space heating fuels as natural gas (hereinafter NG),

electricity and oil derivatives (hereinafter gasoil), among other residual fuels such as wood.

By cross-referencing both data, it can be verified that individual NG heating systems are the most usual ones, accounting for 40.9% of the total RDs, followed by electrical systems, which account for another 34.8%, including both heating devices and individual systems. By contrast, collective systems are only substantive in a few representative dwellings, such as RD 6, RD 11, RD 13, RD 14 and RD 17, with a relevant share of gasoil. Based on these results, two RBs, with thermal systems of different mean seasonal efficiencies (MSE), are defined for each of the 17 building archetypes (Fig. 2).

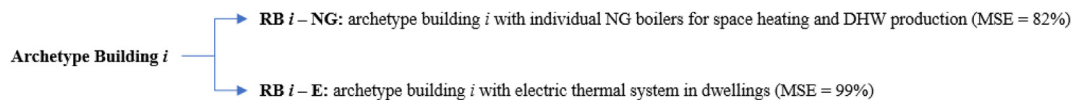
Thus, the cost-optimal methodology is applied to a total of 34 RBs, which account for 76% of the dwellings classified within the building archetypes or, what is the same, 67% of the total residential stock of Bilbao (which is made up of 147,655 dwellings). The representativeness of every RB is provided in Table 2, in which it can be verified that the analysed RBs cover more than half of the RDs in all cases, except for RD 11, RD 14 and RD 17. Hereinafter reported weighted values are based on the representativeness of every RB shown in Table 2. The base cases for RBs are defined as the current "as-built" status of the building, without any maintenance repair. Therefore, no baseline retrofitting level, representing a minimum indispensable level of renovation, is considered.

### 2.2. DHW base consumption

The DHW demand per inhabitant is estimated based on [45], which described the fuel consumption survey carried out to obtain additional real data for the validation of the models of building archetypes. Besides the information that such survey provided in terms of annual heating energy consumption, it also allows the average per-capita DHW consumption of dwellings in Bilbao to be estimated.

**Table 1**  
Summary of main characteristics of the building archetypes used to define the RBs.

| Building archetype | RD    | Urban Form        | Facade length (m) | Building width (m) | Dwellings area (m <sup>2</sup> ) | Occupants per dwelling | Dwellings per floor | Over ground floors (excl. ground floor) | Facade U (W/m <sup>2</sup> K) | Orientation |
|--------------------|-------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------------------|------------------------|---------------------|---|-------------------------------|-------------|
| Arch. 1            | RD 1  | Linear block      | 14.0              | 10.0               | 60                               | 2                      | 2                   | 4                                       | 1.77                          | South-west  |
| Arch. 2            | RD 2  | Linear block      | 17.0              | 10.0               | 75                               | 2                      | 2                   | 4                                       | 1.77                          | South-west  |
| Arch. 3            | RD 3  | Solid block       | 10.0              | 14.0               | 60                               | 2                      | 2                   | 7                                       | 2.04                          | West        |
| Arch. 4            | RD 4  | Solid block       | 14.0              | 12.1               | 75                               | 2                      | 2                   | 7                                       | 1.77                          | West        |
| Arch. 5            | RD 5  | Solid block       | 17.0              | 13.5               | 105                              | 3                      | 2                   | 7                                       | 1.77                          | West        |
| Arch. 6            | RD 6  | Solid block       | 20.0              | 13.0               | 120                              | 3                      | 2                   | 7                                       | 1.77                          | West        |
| Arch. 7            | RD 7  | Linear block      | 20.0              | 10.0               | 60                               | 2                      | 3                   | 4                                       | 1.26                          | South-west  |
| Arch. 8            | RD 8  | Linear block      | 24.5              | 10.0               | 75                               | 2                      | 3                   | 4                                       | 1.26                          | South-west  |
| Arch. 9            | RD 9  | Linear block      | 9.1               | 22.0               | 60                               | 2                      | 3                   | 6                                       | 1.26                          | South-west  |
| Arch. 10           | RD 10 | Linear block      | 11.1              | 22.0               | 75                               | 2                      | 3                   | 6                                       | 1.38                          | South-west  |
| Arch. 11           | RD 11 | Solid block       | 17.0              | 19.7               | 105                              | 2                      | 3                   | 6                                       | 1.26                          | West        |
| Arch. 12           | RD 12 | Linear block      | 20.0              | 10.0               | 60                               | 2                      | 3                   | 12                                      | 1.38                          | South-west  |
| Arch. 13           | RD 13 | Linear block      | 9.4               | 26.0               | 75                               | 2                      | 3                   | 12                                      | 1.38                          | South-west  |
| Arch. 14           | RD 14 | Detached building | 18.3              | 18.3               | 105                              | 3                      | 3                   | 12                                      | 1.38                          | South       |
| Arch. 15           | RD 15 | Linear block      | 20.4              | 12.0               | 75                               | 3                      | 3                   | 4                                       | 0.63                          | South-west  |
| Arch. 16           | RD 16 | Linear block      | 13.6              | 18.1               | 75                               | 3                      | 3                   | 6                                       | 0.93                          | South-west  |
| Arch. 17           | RD 17 | Linear block      | 18.0              | 13.6               | 75                               | 3                      | 3                   | 13                                      | 0.75                          | South-west  |



**Fig. 2.** Scheme of the partition of each building archetype into two different RBs.

**Table 2**  
Representativeness of the defined RBs.

| Building archetype | RD    | Total number of RDs | RB         | Share of RDs covered | RB        | Share of RDs covered | Total share of RDs included in RBs |
|--------------------|-------|---------------------|------------|----------------------|-----------|----------------------|------------------------------------|
| Arch. 1            | RD 1  | 8,642               | RB 1 - NG  | 36.0%                | RB 1 - E  | 59.2%                | 95.2%                              |
| Arch. 2            | RD 2  | 9,402               | RB 2 - NG  | 47.3%                | RB 2 - E  | 47.4%                | 94.7%                              |
| Arch. 3            | RD 3  | 5,496               | RB 3 - NG  | 39.7%                | RB 3 - E  | 53.0%                | 92.7%                              |
| Arch. 4            | RD 4  | 12,371              | RB 4 - NG  | 52.8%                | RB 4 - E  | 38.5%                | 91.4%                              |
| Arch. 5            | RD 5  | 5,054               | RB 5 - NG  | 55.2%                | RB 5 - E  | 24.9%                | 80.2%                              |
| Arch. 6            | RD 6  | 3,551               | RB 6 - NG  | 43.4%                | RB 6 - E  | 11.4%                | 54.8%                              |
| Arch. 7            | RD 7  | 7,080               | RB 7 - NG  | 41.3%                | RB 7 - E  | 55.8%                | 97.1%                              |
| Arch. 8            | RD 8  | 8,206               | RB 8 - NG  | 46.3%                | RB 8 - E  | 40.6%                | 86.9%                              |
| Arch. 9            | RD 9  | 7,527               | RB 9 - NG  | 51.7%                | RB 9 - E  | 38.5%                | 90.2%                              |
| Arch. 10           | RD 10 | 19,089              | RB 10 - NG | 36.1%                | RB 10 - E | 33.8%                | 69.8%                              |
| Arch. 11           | RD 11 | 4,165               | RB 11 - NG | 8.4%                 | RB 11 - E | 14.5%                | 22.9%                              |
| Arch. 12           | RD 12 | 4,278               | RB 12 - NG | 20.5%                | RB 12 - E | 68.3%                | 88.9%                              |
| Arch. 13           | RD 13 | 13,486              | RB 13 - NG | 33.5%                | RB 13 - E | 19.8%                | 53.3%                              |
| Arch. 14           | RD 14 | 5,296               | RB 14 - NG | 13.4%                | RB 14 - E | 11.4%                | 24.8%                              |
| Arch. 15           | RD 15 | 5,894               | RB 15 - NG | 64.8%                | RB 15 - E | 20.8%                | 85.6%                              |
| Arch. 16           | RD 16 | 7,284               | RB 16 - NG | 55.5%                | RB 16 - E | 18.4%                | 73.9%                              |
| Arch. 17           | RD 17 | 2,969               | RB 17 - NG | 21.9%                | RB 17 - E | 10.2%                | 32.1%                              |

The output of the survey provided a daily average DHW consumption of 40 L at 60 °C per person, which is 44% higher than the per-capita consumption set by the CTE DB HE (28 L). Nevertheless, there are few studies in the literature which collect information on DHW use in households, so it is fair to wonder whether the

current national standard is outdated or does not rightly represent the real DHW consumption. In this sense, the results obtained from the conducted survey lie within the order of magnitude of the outcomes from other field studies. For example, [52] provides a per-capita DHW use of 45 L per day at 52 °C in Canada. In Australia,

[53] estimates a 40 °C DHW daily consumption of 62 L per inhabitant, while [54] provides a mean household daily use of 122 L at 52 °C in the UK. For an average household size of 2.5 occupants, the latter corresponds to 49 L of per-capita consumption.

Furthermore, the outcomes from the survey show an interesting trend of a decreasing per-capita consumption as the dwelling's occupancy increases from 1 to 4 inhabitants (Fig. 3). This is likely due to an economy of scale effect with DHW conservation from shared dishwasher and cleaning demands. In consequence, the less occupied dwellings show a significantly higher DHW consumption per-capita than the value given by the national standard, as occurs in other studies [55]. On the contrary, as occupancy increases, the mean DHW consumption comes very near to the standard value. Therefore, all the above-stated fits with the obtained average daily DHW consumption of 40 L per person (at 60 °C), which is set for the RBs' base cases. The resulting total daily DHW consumption of each RB is provided in Table 7.

### 2.3. Energy efficiency measures

There are multiple technical solutions which permit reductions in space heating and DHW energy consumption to be achieved, so the combination of retrofiting alternatives could be very extensive. The EEMs considered in the present analysis do not intend to be exhaustive and neither are they closed, they simply cover a reasonable range of possible EEMs. The selected EEMs are based on currently extended practices, which have been demonstrated to be technically feasible and widely implementable for a large number of buildings.

The chosen EEMs and their abbreviated names are presented in Table 3. In summary, the set of interventions pursues three different objectives: to reduce space heating demand, to supply the required energy more efficiently and to increase the share of the renewable energies in the energy use of the building.

Four outdoor and three indoor thermal insulation levels are evaluated, ranging between preceding CTE DB HE [56] compliance and EnerPHit levels [57]. These insulation levels are applied to the facade and the roof at the same time, ensuring a coherent envelope insulation. Table 4 shows the applied insulation thicknesses for each RB, which differ depending on the original façade type. Since post-1981 buildings are already slightly insulated, only three outdoor insulation levels are evaluated on them. Due to its continuity, the external insulation allows the effect of several thermal bridges to be significantly reduced. After-intervention values of linear transmittance considered in the analysis are obtained from [58].

It has been considered that the benefits of window replacement also include increased airtightness, which is also a common assumption in the literature [39,59]. Therefore, the infiltration rate decreases when window replacement is included within a package of measures. Considering that even the performance of very tight windows could be reduced due to errors in the work execution (e.g., improper mounting of the frame), and aiming to be on the

safe side in the calculation of achievable energy savings, a conservative 25% infiltration rate reduction is contemplated in the present analysis, which is in the lower range of the outcomes of several studies performed in the Iberian peninsula [60–63].

In order to constitute a package of measures, combinations of passive EEMs were analysed in the first stage. Design Builder v.6 energy simulation software was used to calculate improved space heating energy demands. Table 5 summarizes the simulated combinations of measures, which were reproduced for each façade insulation level  $II_i - x$ .

Energy demand outputs were later combined with interventions on the thermal system or the installation of renewable energies, according to Table 6. The effect of the new NG condensing boiler over the existing systems is calculated through the MSE. In total, 464 packages of measures were applied to each RB.

The sizing of the solar water system was defined for specific solar contribution factors, i.e. the fraction of the DHW demand covered by solar thermal energy over the total annual DHW energy demand. The last update of the CTE DB HE regulation increased the minimum solar contribution percentage which is applicable in the climatic zone of Bilbao from 30% to 60%. Both levels of solar contribution factors are defined for each RB. The dimensioning of the system is initially carried out using the F-Chart method [64], which is a semi-empirical method developed to estimate the annual fraction of the total heating load that can be supplied by a solar energy system. Table 7 summarizes the total daily DHW consumption of each RB, as well as the number of collectors and storage tank capacity needed to approximate each solar contribution factor. The orientation of the collectors was assumed to be the buildings' orientation (Table 1).

Calculations are then carried out in hourly time steps using SAM's Solar Water Heating module [65], which models a closed-loop flat plate collector that transfers solar energy from the working fluid to the water storage tank, shaped as a dual-mode model, by a heat exchanger. The DHW draw profile introduced in the simulations, shown in Fig. 4, accommodates common DHW consumption patterns that have been investigated in the literature [66,67] to a real working schedule in the analysed location. The y-axis indicates the share of the daily DHW consumption that is used every hour. There is often an intensive early morning peak, which presumably coincides with the morning showers, and a smaller evening peak, whose timing and width could depend on cultural habits. Thus, showers represent the major DHW consumption [68], which lessens during the mid-afternoon hours. At weekends, the consumption pattern may temporally differ from workdays, and the lower water mains temperature during the winter could drive the occupants to use hot water for some tasks which generally only need cold water, such as hand washing [69]. Nevertheless, no weekly or seasonal variations are introduced in the simulations. Table 7 also summarizes the solar contribution factors obtained with each solar system.

Concerning photovoltaic systems, the CTE DB HE establishes a minimum power of renewable electricity generation that must be installed in certain buildings, depending on their total floor area. In addition, a limit is also set for such minimum installable power, according to the building's roof area. The present study used these calculation methods as the sizing criteria of the analysed photovoltaic systems, which are simulated with SAM's Detailed Photovoltaic Model [70]. Solar energy to electricity conversion efficiencies of the modules are calculated by the CEC Performance Model. Table 7 provides the number of fixed modules and inverter powers modelled, as well as the results of the simulations. A DC/AC ratio of 1.15 is considered. The modules' orientation and tilt match with those for solar thermal collectors in each RB. For both solar thermal collectors and photovoltaic modules, the maximum available space on the roof of each building is assumed to be 50% of the

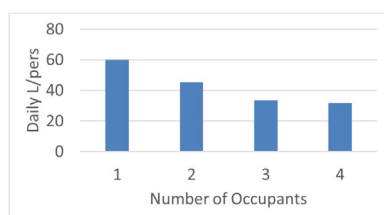


Fig. 3. Mean daily DHW per-capita consumption (60 °C) according to the occupancy of a dwelling.

**Table 3**  
Selected EEMs.

| EEM                                    | Description  | Name                | Main technical features  | Investment Cost                  |
|--|--|---------------------|--|----------------------------------|
| Facade thermal insulation              | Addition of 4 different levels of external insulation (ETICS), with mineral wool panels fixed by means of mortar to the existing façade and an external waterproof decorative mortar. It includes the required scaffolding.<br>Addition of 3 different levels of internal mineral wool insulation comprised of a direct plasterboard cladding. It includes the final painting.   | IL <sub>i</sub> – E | Mineral wool ( $\lambda = 0.038$ W/mK)   | 59 – 78 €/m <sup>2</sup>         |
|  |  | IL <sub>i</sub> – I | Mineral wool ( $\lambda = 0.038$ W/mK)   | 30 – 56 €/m <sup>2</sup>         |
| Roof thermal insulation                | Dismantling of the existing ceramic tiles layer, installation of the mineral wool panel insulation between wooden strips and placing the waterproofing and the new ceramic tile covering. The insulation thickness is assimilated to the façade's insulation.  | RI <sub>i</sub>     | Mineral wool ( $\lambda = 0.038$ W/mK)   | 83 – 98 €/m <sup>2</sup>         |
| Internal partitions thermal insulation | Addition of 1 cm insulation to the walls in contact with non-heated areas of the building.   | PI                  | EPS ( $\lambda = 0.038$ W/mK)  | 30 €/m <sup>2</sup>              |
| Windows replacement                    | Installation of 4/6/4 double-glazed windows, PVC frame.<br>Installation of 6/16/4 Low-E double-glazed windows, PVC frame.  | W1                  | U <sub>glass</sub> = 3.3 W/m <sup>2</sup> K ; g = 0.76   | 267 €/m <sup>2</sup>             |
|  |  | W2                  | U <sub>glass</sub> = 1.4 W/m <sup>2</sup> K ; g = 0.63   | 307 €/m <sup>2</sup>             |
| Heating system improvement             | Installation of a new condensing boiler.<br>Installation of a new NG supply line, NG meters, risers, dwellings' NG installation, thermostats, hot water distribution piping and radiators.   | CB                  | 25 kW MSE = 86% (HHV basis)  | 2,000 €                          |
|  |  |                     | –  | 41 – 52 €/m <sup>2</sup> *       |
| Solar thermal collectors               | Installation of flat plate collectors for DHW production, including support structures, hydraulic connections, heat exchanger, pumps and DHW storage tank, as well as DHW distribution piping that reaches each dwelling. Sized to cover 30% of DHW demand.<br>Installation of flat plate collectors for DHW production, including support structures, hydraulic connections, heat exchanger, pumps and DHW storage tank, as well as DHW distribution piping that reaches each dwelling. Sized to cover 60% of DHW demand. | DHW 30%             | Collector area = 2.3 m <sup>2</sup> F <sub>R</sub><br>( $\tau\alpha$ ) <sub>n</sub> = 0.76F <sub>R</sub> U <sub>L</sub> = 4 W/m <sup>2</sup> K | 1,046 – 1,419 €/m <sup>2</sup> * |
|  |  | DHW 60%             |  | 688 – 844 €/m <sup>2</sup> *     |
| Photovoltaic                           | Installation of a PV system on a sloping roof, constituted by multi-c-Si panels, their supporting structure and inverters. The costs also include erection certificates and technical reports needed to legalize the facility.   | PV                  | 330 W <sub>p</sub> panels (1,95 m <sup>2</sup> )<br>Panel nominal eff. = 17%<br>Inverter weighted eff. = 97%<br>Degradation = 0.8%/year        | 205 – 220 €/m <sup>2</sup> *     |

**Table 4**  
Applied insulation thicknesses and resulting façade U values per RB.

|   | RB        | 1                                       | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   |      |   |
|---|-----------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| External insulation                     | Base case | Facade U (W/m <sup>2</sup> K)           | 1.77 | 1.77 | 2.09 | 1.77 | 1.77 | 1.77 | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 1.38 | 1.26 | 1.38 | 1.38 | 1.38 | 0.63 | 0.93 | 0.75 |   |
|   | IL1 – E   | Added insul. thick. (cm)                | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    | 2    |   |
|   |           | Retrofit. facade U (W/m <sup>2</sup> K) | 0.74 | 0.74 | 0.78 | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.8  | 0.76 | 0.8  | 0.8  | 0.8  | 0.47 | 0.54 | 0.54 |   |
|   | IL2 – E   | Added insul. thick. (cm)                | 5    | 5    | 6    | 5    | 5    | 5    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 6    | 5 |
|   |           | Retrofit. facade U (W/m <sup>2</sup> K) | 0.47 | 0.47 | 0.48 | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.54 | 0.54 | 0.54 | 0.56 | 0.54 | 0.56 | 0.56 | 0.56 | 0.38 | 0.38 | 0.38 |   |
|   | IL3 – E   | Added insul. thick. (cm)                | 7    | 7    | 8    | 7    | 7    | 7    | 7    | 7    | 7    | 7    | 7    | 7    | 7    | 7    | 7    | 9    | 8    |   |
|   |           | Retrofit. facade U (W/m <sup>2</sup> K) | 0.37 | 0.37 | 0.38 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | 0.39 | 0.38 | 0.39 | 0.39 | 0.39 | 0.29 | 0.29 | 0.29 |   |
|   | IL4 – E   | Added insul. thick. (cm)                | 11   | 11   | 11   | 11   | 11   | 11   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   | 10   |      |      |      |   |
| Retrofit. facade U (W/m <sup>2</sup> K) |           | 0.29                                    | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.3  | 0.29 | 0.3  | 0.3  | 0.3  |      |      |      |      |   |
| Internal insulation                     | IL1 – I   | Added insul. thick. (cm)                | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    |      |      |      |      |   |
|   |           | Retrofit. facade U (W/m <sup>2</sup> K) | 0.74 | 0.74 | 0.78 | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.8  | 0.76 | 0.8  | 0.8  | 0.8  |      |      |      |   |
|   | IL2 – I   | Added insul. thick. (cm)                | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 4    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    | 3    |      |      |      |      |   |
|   |           | Retrofit. facade U (W/m <sup>2</sup> K) | 0.62 | 0.62 | 0.65 | 0.62 | 0.62 | 0.62 | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 0.66 | 0.63 | 0.66 | 0.66 | 0.66 |      |      |      |   |
|   | IL3 – I   | Added insul. thick. (cm)                | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 6    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    | 5    |      |      |      |      |   |
|   |           | Retrofit. facade U (W/m <sup>2</sup> K) | 0.47 | 0.47 | 0.48 | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.49 | 0.47 | 0.49 | 0.49 | 0.49 |      |      |   |

total roof area. That this constraint is satisfied is verified in each case.

Finally, the national factors used to convert the calculated final energy consumptions into nr-PE and equivalent CO<sub>2</sub> emissions are presented in Table 8.

#### 2.4. Global cost calculation

The defined calculation period of the present approach is 28 years, as it assumes a timeframe which starts in the year

**Table 5**  
Combinations of passive measures simulated for each insulation level  $II_i - x$ .

| n° | Facade Insulation | Windows | Roof Insulation | Internal partition Insulation |
|----|-------------------|---------|-----------------|-------------------------------|
| 1  |                   | W1      |                 |                               |
| 2  |                   | W2      |                 |                               |
| 3  | $II_i - x$        |         |                 |                               |
| 4  | $II_i - x$        | W1      |                 |                               |
| 5  | $II_i - x$        | W2      |                 |                               |
| 6  | $II_i - x$        |         | $RI_i$          |                               |
| 7  | $II_i - x$        | W1      | $RI_i$          |                               |
| 8  | $II_i - x$        | W2      | $RI_i$          |                               |
| 9  | $II_i - x$        | W1      | $RI_i$          | PI                            |
| 10 | $II_i - x$        | W2      | $RI_i$          | PI                            |

**Table 6**  
Combination of EEMs considered in the packages of measures.

| n° | Combinations of interventions |
|----|-------------------------------|
| 1  | Passive measures (P) only     |
| 2  | P + CB                        |
| 3  | P + DHW 30%                   |
| 4  | P + DHW 60%                   |
| 5  | P + PV                        |
| 6  | P + CB + DHW 30%              |
| 7  | P + CB + DHW 60%              |
| 8  | P + CB + PV                   |

2022 and ends in the year 2050, when the European target for the decarbonisation of the economy should have been achieved.

Investment costs of the different EEMs, which can be seen in Table 3, are based on market prices. To this end, the Spanish CYPE database [71] and the Basque Government's *Construction and Urbanization Prices Database* [72] were used, which include material costs and labour costs. On top of that, an additional 5% of overhead costs and another 8% of constructor's profit have been considered. In the private perspective, a reduced VAT of 10% and a municipal tax of 2.5% were also included, with a 60% tax rebate on the latter for the solar systems.

Annual costs considered in this study include maintenance, replacement, and energy costs. In addition, the calculations from the macroeconomic perspective include carbon cost as well. The maintenance cost is estimated as a percentage of the investment

cost, according to the values shown in Table 9. No maintenance cost is considered for the new condensing boiler as it is assumed that it would be similar to the cost faced with the current system, so no relevant variation would exist. Table 9 also shows the lifespan considered for each retrofit measure. For elements that have a shorter lifetime than the calculation period, the succeeding replacement cost is assumed to be the same, in real terms, as the investment cost. On the other hand, residual values are taken into consideration, discounted to the beginning of the calculation period, for components whose lifetime exceeds the latter. The residual value is determined by a straight-line depreciation of the initial investment (or replacement cost). No disposal costs are considered.

Focusing on the future development of electricity prices, the authors believe that the grid access fees, necessary to finance the maintenance of the electrical system, will not vary substantially, remaining stable. In addition, considering that the income from electricity taxation represents an essential governmental resource, it is not likely to be reduced either. The price uncertainty range would therefore be subject to the wholesale market price variations, which represents around 30% of the electric bill paid by final consumers [73]. It can be expected that the gradual introduction of renewable energy technologies, as well as the planned improvement of cross-border electrical interconnections, will tend to reduce the influence of NG and coal on the wholesale market clearing prices. Although these investments, required for the decarbonisation of the electrical system, could temporarily increase the price of electricity [74], in the longer term the fuel cost savings, as well as renewable technologies costs reduction due to learning

**Table 7**  
Sizing and results of the modelled renewable systems (although summarized in the same table, please note that DHW 30%, DHW 60% and PV EEMs were applied separately, never combined, according to Table 8).

|       | DHW 30% system    |          |                   |             |                           | DHW 60% system    |             |                           | PV system      |               |                        |      |
|-------|-------------------|----------|-------------------|-------------|---------------------------|-------------------|-------------|---------------------------|----------------|---------------|------------------------|------|
|       | Daily DHW use (L) | Tilt (°) | no. of collectors | Storage (L) | Solar contribution factor | No. of collectors | Storage (L) | Solar contribution factor | no. of modules | Inverter (kW) | Annual output (kWh/kW) | PR   |
| RB 1  | 640               | 30       | 3                 | 1,000       | 0.36                      | 7                 | 1,000       | 0.62                      | 14             | 1 × 4.2 kW    | 1,105                  | 0.78 |
| RB 2  | 640               | 30       | 3                 | 1,000       | 0.36                      | 7                 | 1,000       | 0.62                      | 18             | 1 × 5.2 kW    | 1,105                  | 0.78 |
| RB 3  | 1,120             | 20       | 5                 | 1,500       | 0.31                      | 14                | 1,700       | 0.58                      | 24             | 1 × 6.5 kW    | 985                    | 0.79 |
| RB 4  | 1,120             | 20       | 5                 | 1,500       | 0.31                      | 14                | 1,700       | 0.58                      | 27             | 1 × 7.9 kW    | 985                    | 0.79 |
| RB 5  | 1,680             | 20       | 8                 | 2,000       | 0.33                      | 22                | 2,600       | 0.60                      | 36             | 2 × 5.3 kW    | 983                    | 0.78 |
| RB 6  | 1,680             | 20       | 8                 | 2,000       | 0.33                      | 22                | 2,600       | 0.60                      | 40             | 2 × 6 kW      | 982                    | 0.78 |
| RB 7  | 960               | 30       | 4                 | 1,200       | 0.33                      | 10                | 1,200       | 0.60                      | 22             | 1 × 6.3 kW    | 1,105                  | 0.78 |
| RB 8  | 960               | 30       | 4                 | 1,200       | 0.33                      | 10                | 1,200       | 0.60                      | 27             | 1 × 7.8 kW    | 1,096                  | 0.77 |
| RB 9  | 1,440             | 30       | 6                 | 1,600       | 0.33                      | 15                | 1,800       | 0.60                      | 32             | 2 × 4.6 kW    | 1,092                  | 0.77 |
| RB 10 | 1,440             | 30       | 6                 | 1,600       | 0.33                      | 15                | 1,800       | 0.60                      | 40             | 2 × 5.6 kW    | 1,092                  | 0.77 |
| RB 11 | 1,440             | 20       | 6                 | 1,800       | 0.30                      | 18                | 2,100       | 0.58                      | 54             | 2 × 7.7 kW    | 981                    | 0.78 |
| RB 12 | 2,880             | 30       | 11                | 3,000       | 0.32                      | 30                | 3,500       | 0.61                      | 32             | 2 × 4.6 kW    | 1,092                  | 0.77 |
| RB 13 | 2,880             | 30       | 11                | 3,000       | 0.32                      | 30                | 3,500       | 0.61                      | 39             | 2 × 5.6 kW    | 1,090                  | 0.77 |
| RB 14 | 4,320             | 30       | 16                | 4,500       | 0.32                      | 42                | 5,000       | 0.62                      | 54             | 2 × 7.7 kW    | 1,166                  | 0.79 |
| RB 15 | 1,440             | 30       | 6                 | 1,600       | 0.34                      | 15                | 1,800       | 0.61                      | 27             | 1 × 7.8 kW    | 1,096                  | 0.77 |
| RB 16 | 2,160             | 30       | 9                 | 2,400       | 0.34                      | 23                | 2,700       | 0.62                      | 40             | 2 × 5.7 kW    | 1,092                  | 0.77 |
| RB 17 | 4,680             | 30       | 18                | 5,000       | 0.32                      | 42                | 5,200       | 0.57                      | 40             | 2 × 5.6 kW    | 1,092                  | 0.77 |

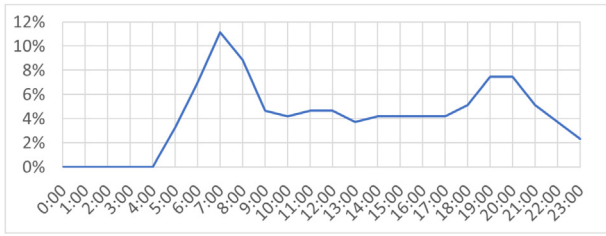


Fig. 4. DHW draw profile introduced in the simulations.

Table 8  
National conversion factors.

|             | kWh <sub>nr-PE</sub> / kWh <sub>FE</sub> | kgCO <sub>2</sub> / kWh <sub>FE</sub> |
|-------------|--|---------------------------------------|
| Natural gas | 1.19                                     | 0.252                                 |
| Electricity | 1.954                                    | 0.331                                 |

Table 9  
Lifespan and maintenance cost of the different EEMs.

|                          | Lifespan | Annual Maintenance Cost |
|--------------------------|----------|-------------------------|
| Opaque envelope elements | 50       | 0.0%                    |
| Windows                  | 30       | 0.0%                    |
| Condensing boiler        | 20       | 0.0%                    |
| Cu piping, radiators     | 30       | 0.0%                    |
| Solar Thermal System     | 25       | 0.5%                    |
| Photovoltaic system      | 25       | 0.5%                    |

curves and the consequent elimination of any subsidy, could lead to an equilibrium of the average electricity price (despite the higher hourly variability) [75,76]. These trends are compiled in the EU 2016 Reference Scenario [77], which is probably the most comprehensive report on EU energy for a time horizon up to 2050. Its findings include that mean electricity prices will increase up to 2030 and remain broadly stable beyond 2030, which is also considered in [17].

Thus, a similar trend in electricity prices is assumed in the present study, which is depicted (in nominal terms) in Fig. 5. It can be observed how the largest share of the price increment belongs to the expected inflation (which is presented below). Such an evolution is applied to an initial energy price of 10c€/kWh in 2022, while the fixed term of the electric bill, which refers to the contracted power in a dwelling, is excluded from the analysis. It is considered that this fixed term will be paid anyhow by every dwelling, as it is necessary for other end-uses such as lighting and domestic appliances regardless of the fuel used for space heating and DHW. In addition to the 21% VAT, the Spanish electrical tax of 5.11% is also included in the microeconomic calculations.

Additionally, the Spanish legal framework that regulates self-consumption energy installations in the residential building sector has recently been updated. A relevant novelty introduced by the Decree 15/2018 [78], which was supplemented by the Decree 244/2019 [79], is the so-called *net balance*, allowing some remuneration for the surplus photovoltaic production exported to the electrical grid. In the free market, the electricity injected to the grid is valued at an hourly price to be agreed between the trading company and the consumer, while in the regulated market it is derived from the hourly results of the daily and intraday wholesale markets, deducting the cost of the network deviations [80]. Based on the wholesale market historical evolution and considering that the network deviations costs are negligible, a price of 5c€/kWh is set for the photovoltaic surplus, which will develop according to the variation of electricity prices.

In each billing period, the financial compensation is made on an hourly basis, balancing the energy consumed from the grid with the injected photovoltaic surpluses. Thus, at the end of every billing period each hour could reflect either a net surplus or a net consumption. Due to the lower photovoltaic surplus selling price in comparison with the electrical energy price borne by households, the more the domestic consumption is accommodated to the timing of the generated energy, the greater the savings would be. In the present study, it is assumed that 30% of the photovoltaic production contributes to decrease the electricity consumed from the grid by the occupants, while the remaining 70% constitutes a surplus injected to the grid at different moments. Nevertheless, the economic benefits from the photovoltaic installation would be further optimised when the self-consumption of the generated photovoltaic production is maximised.

On the other hand, NG prices often show a cyclical pattern, varying significantly on a seasonal basis. During the last decade, the variable term of the Spanish NG bill has fluctuated around a pretty stable average value, without showing a notable increasing trend [81]. At the same time, the fixed term has remained almost flat. In the long-term, a similar price stability is expected: according to [82], NG prices will not follow the strong upward trend of oil price, by decoupling from them and staying at a certain level in real terms. This could be aligned with the existing change of paradigm on the NG pricing mechanism and the decline in importance of oil-indexed prices [74]. Other relevant forecasts provide a very similar NG price trend in the medium-term [83,84]. This price stability could probably be supported by the new liquefied natural gas (LNG) supply [85,86], from which Spain could benefit thanks to its leadership status in LNG infrastructures, as well as through the outcomes of the recent union of the French TRS and PEG gas markets into a single French market, whose greater liquidity and integration with the northern European hubs could also contribute to an increased convergence of the novel Spanish market with the rest of the European hubs [87]. This should compensate for the

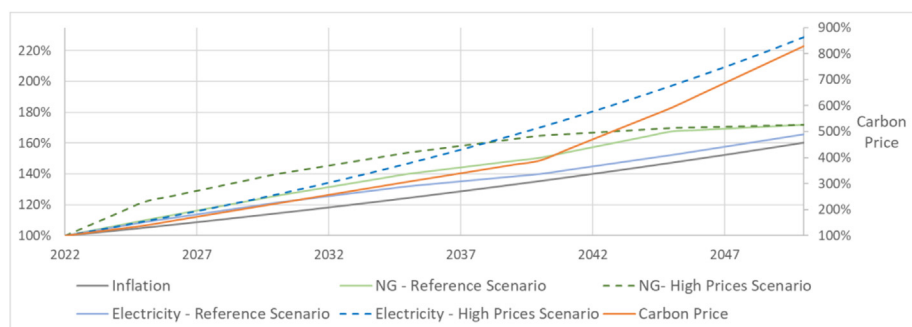
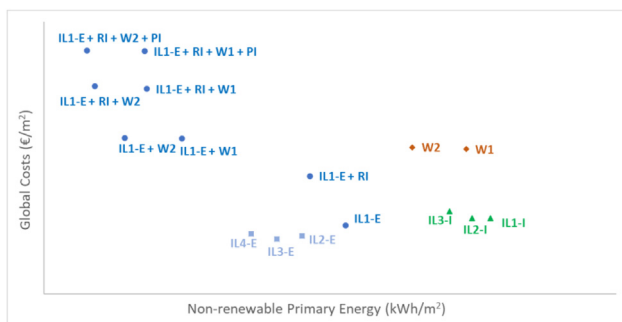


Fig. 5. Defined long-term nominal prices evolution.



**Fig. 6.** nr-PE consumption and GC map of the different passive renovation packages.

foreseeable increase of NG consumption for electricity production, which may be driven by the closure of the existing coal plants.

Accordingly, a rather stable NG price increase is assumed, based on the actual prices provided by [82] and applying the estimated inflation rate. Fig. 5 shows the nominal price increase implemented on an initial energy price of 5.3c€/kWh in 2022. The fixed term of the NG bill is kept constant at 0.28 €/day. As with electricity, 21% VAT is also considered in the microeconomic calculations, as well as the Spanish hydrocarbon tax of 0.234c€/kWh.

In order to estimate the future development of the inflation rate, economic data provided by EUROSTAT and the Bank of Spain (BdE) were reviewed. According to the Harmonised Indices of Consumer Prices (HICP) data published in EUROSTAT [88], during the last decade, European inflation was most of the time well below 2%, and the eurozone long-term forecast is that it will remain likewise. It is reasonable to expect that the European Central Bank's (ECB) mandate of controlling the inflation below, but close to, 2% will contribute to keeping the rate around 2% [89]. Nothing seems to foresee an inflationist trend for the next decades in Spain either. The consumer price index has remained below 2% since 2013 [90] and the recent evolution of the industrial producer price index, which measures price changes from the seller's perspective and therefore can serve as an early indicator of inflationary pressures in the economy, does not indicate the latter either. For an expected framework of a low economic growth similar to the last decade, determined by the maturity of European economics and deepened by the shock resulting from the Covid-19 crisis, an average inflation rate of 1.7% is considered within the economic analysis.

Concerning the determination of the discount rate, the following assumptions have been taken: a) it is contextualised to the Spanish framework, b) inflation is included in the discount rate estimation and, c) no alternative investment comparison (opportunity cost or the value of the next best alternative foregone) has been considered. Thus, the cost of borrowing undertaken by Spanish households is analysed from the data published by the BdE [90]. With the help of the monetary policy deployed by the ECB, especially the Asset Purchase Programme (APP) since 2014, such cost of borrowing has experienced a clearly decreasing tendency. The 2019 interest rates, in terms of Narrowly Defined Effective Rate (NDER), reached 1.75% in the lending for house purchase (which also includes home refurbishments) and 7.25% in consumption loans, the 2015–2019 five-year average being 2.28% and 7.80%, respectively. Nevertheless, it should be considered that not every household would ask for finance when facing an investment, as this would depend on its wealth and savings capacity. Overall, an average cost of capital of 4% is finally considered in the private perspective.

From the macroeconomic perspective, the cost of capital undertaken by the Spanish Government is used. Recent data on debt instruments' tenders [91] show that the cost of financing remained

at reasonably stable values, even though the Covid-19 crisis has already impacted the Spanish economy. Moreover, the perspective of the major rating agencies on the Spanish Government's credit quality is stable. Looking at Spanish payments for 30 years, it is verified reasonable to consider a macroeconomic discount rate of 1.7%.

Finally, the carbon cost is also considered within the calculations from the macroeconomic perspective. Although Annex II of the Delegated Regulation 244/2012 [14] provided an estimation of long-term Emissions Trading System (ETS) carbon price development, the scene has significantly changed since then. Apart from the changes implemented for the 2013–2020 third trading period (a single EU-wide cap on emissions, the decrease of free allocation of allowances, etc.), the creation of the Market Stability Reserve (MSR) [92] and its subsequent strengthened capacity to more rapidly reduce the allowance surplus [93] will certainly contribute to enhancing the increasing trend in the carbon price. To this effect, by modelling the MSR together with a continuously decreasing number of available allowances, [77] provides the most comprehensive estimation of the ETS price. Thus, starting from a price of 18 €/t<sub>CO2</sub> in 2022, the same price trend (shown in Fig. 5) is assumed within the present analysis.

### 3. Results

#### 3.1. Energy renovation packages

Comparing the influence of the different passive renovation measures on space heating energy demand, insulating the exterior of the existing facades shows the highest energy saving effect. This effect increases with the façade area exposed to the outside, as well as with worse insulated (older) facades. Depending on the building, an externally insulated façade could reduce the current heating demand by 19–47%. The lower boundary refers to buildings located in solid blocks and constituted by facades with medium transmittance levels, in which achievable demand savings range between 13 and 19%, depending on the added insulation thickness. On the other hand, the upper limit refers to buildings with poorly insulated envelope situated in linear blocks (35–47%), as well as to detached buildings with medium transmittance levels (31–46%). In between, most recent (better insulated) buildings, usually located in linear blocks, show similar savings potential (22–37%) to older poorly insulated buildings placed in solid blocks (24–36%).

On the contrary, due to the associated increment of thermal bridges, the internal façade insulation shows much lower effectiveness, of about half the savings achievable with a similar insulation level placed externally. Nevertheless, the replacement of windows contributes significantly to reducing the space heating energy demand due to the high thermal transmittance and the improvement of air infiltration rate. Its effect ranges from the lowest demand saving of 20%, achieved by simple double-glazed windows in certain buildings, to 36% of saving achievable in some buildings with double-glazed low-E windows. On the other hand, the insulation of the roof and internal partitions shows no relevant impact on space heating demand.

These savings are smoothed in terms of nr-PE when the DHW consumption is also included within the calculation. Fig. 6 maps the change of nr-PE consumption and GC with different passive renovation packages. The comparable nr-PE and GC values of distinct packages of measures may differ depending on the building type, but the qualitative patterns shown in Fig. 6 are in general applicable to all the RBs, regardless of the fuel currently used for thermal uses. Optimum external façade insulation of 7–8 cm is generally observed. It is more pronounced in RBs with electric thermal systems, while the minimum GC area is broader in NG



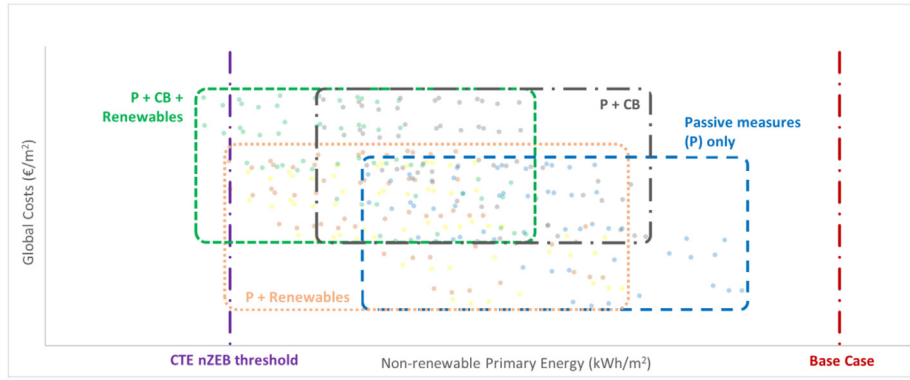


Fig. 7. Qualitative overview of nr-PE and GC private perspective benchmarks in RBs that consume NG.

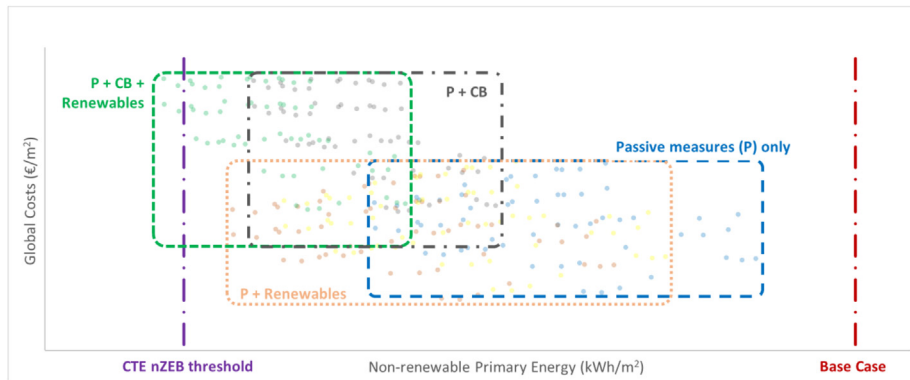


Fig. 8. Qualitative overview of nr-PE and GC private perspective benchmarks in RBs with electrical thermal systems.

consumers, with little GC difference for insulation levels slightly worse or slightly better than the optimum one. In addition, both window types show similar results in terms of GC, being slightly above one or the other depending on the RB. Nevertheless, low-E windows generally show remarkable additional PE savings over the simple double-glazed window. Furthermore, the combination of window replacement with external façade insulation could provide significant supplementary nr-PE savings; although the increment of their GC is also considerable. It would, in any case, be much more effective than the insulation of the roof and internal partitions, which show low improvement in terms of nr-PE with similar GC increments. Nevertheless, it should be noted that the simultaneous addition of double-glazed low-E windows, roof insulation and internal partition insulation to an externally insulated façade could derive in additional nr-PE savings of 28–39%, depending on the RB.

On the other hand, the effects of incorporating interventions on buildings' systems are summarized by Figs. 7 and 8, which provide a qualitative overview of achievable nr-PE and GC private perspective benchmarks in buildings that consume NG and electricity, respectively. It can be observed how the effect of incorporating an efficient condensing boiler reduces as a building is better insulated, in contrast with renewables that have a significant impact on the building nr-PE consumption even in a well-insulated building. Furthermore, it can be verified that, as long as renewable energy sources are not employed, the performance of all the interventions is, in all cases, far from reaching the nZEB performance levels. Moreover, it is worth noting that, in buildings which use electricity for thermal uses, the nZEB consumption levels could only be reached by, in addition to implementing renewable sources, also changing the thermal system to NG.

In general, in buildings which consume electricity for thermal uses, the cost-optimal levels appear to be characterized by a combination of passive measures and solar thermal collectors, which contribute to covering a relevant share of DHW demand that would otherwise have to be satisfied by an expensive electrical consumption. On the contrary, the cost-optimal benchmarks for buildings that are NG consumers are more heterogeneous. In some cases, they are constituted by the insulation of the building's façade only, while in others they are combinations of the latter with renewable systems. Within the latter, solar thermal collectors and photovoltaic systems show a very similar GC to the assumed PV self-utilization scenario. Nevertheless, as the exploitation of PV is optimized, by increasing the self-consumption share (and thus reducing the surplus injected to the grid), the benefits of such a system over the solar thermal collectors would accordingly

Table 10  
Key economic assumptions of the GC calculation.

| Economic parameters             |             | Starting year prices               |                       |
|---------------------------------|-------------|------------------------------------|-----------------------|
| Inflation rate                  | 1.7%        | Electrical energy price            | 10c€/kWh              |
| Private discount rate           | 4%          | Photovoltaic surplus selling price | 5c€/kWh               |
| Macroeconomic discount rate     | 1.7%        | NG energy price                    | 5.3c€/kWh             |
| VAT – Residential refurbishment | 10%         | NG fixed term                      | 0.28 €/day            |
| Municipal tax                   | 2.5%        | Carbon price                       | 18 €/t <sub>CO2</sub> |
| VAT – Energy                    | 21%         |                                    |                       |
| Electrical tax                  | 5.11%       |                                    |                       |
| Hydrocarbon tax                 | 0.234c€/kWh |                                    |                       |

**Table 11**  
Calculated cost-optimal levels in RBs that consume NG.

|                         |          | REFERENCE SCENARIO             |                  |        |                | HIGH ENERGY PRICES SCENARIO    |                  |        |                | BRL BASE CASE SCENARIO         |                  |        |                |
|-------------------------|----------|--------------------------------|------------------|--------|----------------|--------------------------------|------------------|--------|----------------|--------------------------------|------------------|--------|----------------|
|                         |          | nr-PE<br>(kWh/m <sup>2</sup> ) | nr-PE<br>savings | ΔGC    | PBP<br>(years) | nr-PE<br>(kWh/m <sup>2</sup> ) | nr-PE<br>savings | ΔGC    | PBP<br>(years) | nr-PE<br>(kWh/m <sup>2</sup> ) | nr-PE<br>savings | ΔGC    | PBP<br>(years) |
| Private approach        | RB 1-NG  | 70.56                          | 48.7%            | 1.1%   | –              | 70.56                          | 48.7%            | –2.0%  | >28            | 70.56                          | 48.7%            | –13.9% | 14.1           |
|                         | RB 2-NG  | 62.43                          | 51.5%            | 0.7%   | –              | 62.43                          | 51.5%            | –2.6%  | >28            | 62.43                          | 51.5%            | –15.0% | 13.9           |
|                         | RB 3-NG  | 56.80                          | 40.6%            | –3.3%  | >28            | 56.80                          | 40.6%            | –5.5%  | 22.5           | 56.80                          | 40.6%            | –10.4% | 21.3           |
|                         | RB 4-NG  | 52.55                          | 40.9%            | –1.4%  | >28            | 52.55                          | 40.9%            | –3.7%  | >28            | 52.55                          | 40.9%            | –10.1% | 22.2           |
|                         | RB 5-NG  | 52.96                          | 38.7%            | –1.1%  | >28            | 52.96                          | 38.7%            | –3.4%  | >28            | 52.96                          | 38.7%            | –9.4%  | >28            |
|                         | RB 6-NG  | 51.03                          | 39.2%            | –0.7%  | >28            | 51.03                          | 39.2%            | –3.2%  | >28            | 51.03                          | 39.2%            | –9.6%  | 23.4           |
|                         | RB 7-NG  | 66.97                          | 45.0%            | 7.3%   | –              | 66.97                          | 45.0%            | 4.2%   | –              | 66.97                          | 45.0%            | –9.3%  | 20.2           |
|                         | RB 8-NG  | 60.98                          | 46.9%            | 7.6%   | –              | 60.98                          | 46.9%            | 4.2%   | –              | 60.98                          | 46.9%            | –10.0% | 17.0           |
|                         | RB 9-NG  | 54.13                          | 40.4%            | 3.0%   | –              | 54.13                          | 40.4%            | 0.5%   | –              | 54.13                          | 40.4%            | –6.5%  | 21.9           |
|                         | RB 10-NG | 47.65                          | 44.1%            | 2.2%   | –              | 47.65                          | 44.1%            | –0.5%  | >28            | 47.65                          | 44.1%            | –7.8%  | >28            |
|                         | RB 11-NG | 27.28                          | 60.3%            | 1.3%   | –              | 27.28                          | 60.3%            | –2.4%  | >28            | 27.28                          | 60.3%            | –5.8%  | 22.4           |
|                         | RB 12-NG | 69.56                          | 39.3%            | 3.9%   | –              | 69.56                          | 39.3%            | 1.4%   | –              | 69.56                          | 39.3%            | –12.0% | 18.5           |
|                         | RB 13-NG | 52.37                          | 32.1%            | 0.9%   | –              | 52.37                          | 32.1%            | –1.0%  | >28            | 52.37                          | 32.1%            | –8.2%  | >28            |
|                         | RB 14-NG | 55.68                          | 50.5%            | 3.7%   | –              | 55.68                          | 50.5%            | 0.3%   | –              | 55.68                          | 50.5%            | –14.1% | 15.7           |
|                         | RB 15-NG | 50.07                          | 46.6%            | 15.4%  | –              | 50.07                          | 46.6%            | 11.8%  | >28            | 50.07                          | 46.6%            | –3.2%  | 21.4           |
|                         | RB 16-NG | 45.17                          | 48.1%            | 8.2%   | –              | 45.17                          | 48.1%            | 5.0%   | >28            | 45.17                          | 48.1%            | –4.3%  | 21.8           |
|                         | RB 17-NG | 44.47                          | 47.7%            | 12.7%  | –              | 44.47                          | 47.7%            | 9.2%   | >28            | 44.47                          | 47.7%            | –3.9%  | 16.5           |
| Macro-economic approach | RB 1-NG  | 67.27                          | 51.1%            | –13.5% | 23.2           | 67.27                          | 51.1%            | –15.4% | 21.7           | 67.27                          | 51.1%            | –21.6% | 11.9           |
|                         | RB 2-NG  | 62.43                          | 51.5%            | –15.3% | 22.3           | 62.43                          | 51.5%            | –17.3% | 20.7           | 62.43                          | 51.5%            | –23.6% | 11.8           |
|                         | RB 3-NG  | 40.30                          | 57.9%            | –14.6% | 20.7           | 40.30                          | 57.9%            | –16.9% | 19.2           | 40.30                          | 57.9%            | –18.4% | 16.3           |
|                         | RB 4-NG  | 34.31                          | 61.4%            | –14.9% | 21.7           | 34.31                          | 61.4%            | –17.4% | 20.2           | 34.31                          | 61.4%            | –19.6% | 16.8           |
|                         | RB 5-NG  | 32.53                          | 62.4%            | –14.2% | 22.4           | 32.53                          | 62.4%            | –16.6% | 20.8           | 32.53                          | 62.4%            | –18.6% | 18.7           |
|                         | RB 6-NG  | 32.44                          | 61.3%            | –13.6% | 22.8           | 32.44                          | 61.3%            | –16.0% | 21.3           | 32.44                          | 61.3%            | –18.3% | 17.5           |
|                         | RB 7-NG  | 65.32                          | 46.3%            | –8.2%  | >28            | 65.32                          | 46.3%            | –10.1% | 24.7           | 65.32                          | 46.3%            | –17.2% | 15.9           |
|                         | RB 8-NG  | 60.98                          | 46.9%            | –8.9%  | >28            | 60.98                          | 46.9%            | –11.0% | 24.6           | 60.98                          | 46.9%            | –18.4% | 13.8           |
|                         | RB 9-NG  | 34.67                          | 61.8%            | –6.9%  | >28            | 34.67                          | 61.8%            | –9.4%  | 24.4           | 34.67                          | 61.8%            | –12.2% | 17.0           |
|                         | RB 10-NG | 30.59                          | 64.1%            | –11.6% | 23.7           | 30.59                          | 64.1%            | –14.4% | 22.0           | 30.59                          | 64.1%            | –17.0% | 18.3           |
|                         | RB 11-NG | 27.28                          | 60.3%            | –13.8% | 21.0           | 27.28                          | 60.3%            | –16.4% | 19.5           | 27.28                          | 60.3%            | –17.5% | 16.9           |
|                         | RB 12-NG | 53.29                          | 53.5%            | –10.2% | >28            | 53.29                          | 53.5%            | –12.3% | 24.2           | 53.29                          | 53.5%            | –19.0% | 14.9           |
|                         | RB 13-NG | 24.91                          | 67.7%            | –9.3%  | >28            | 24.91                          | 67.7%            | –12.0% | 24.2           | 24.91                          | 67.7%            | –14.3% | 19.9           |
|                         | RB 14-NG | 52.88                          | 53.0%            | –13.6% | 24.7           | 52.88                          | 53.0%            | –15.7% | 23.2           | 52.88                          | 53.0%            | –23.1% | 13.1           |
|                         | RB 15-NG | 50.07                          | 46.6%            | –3.6%  | >28            | 50.07                          | 46.6%            | –5.7%  | >28            | 50.07                          | 46.6%            | –13.5% | 18.1           |
|                         | RB 16-NG | 45.17                          | 48.1%            | –7.9%  | 24.7           | 45.17                          | 48.1%            | –9.9%  | 23.1           | 45.17                          | 48.1%            | –14.6% | 17.4           |
|                         | RB 17-NG | 44.47                          | 47.7%            | –5.2%  | >28            | 44.47                          | 47.7%            | –7.3%  | >28            | 44.47                          | 47.7%            | –14.1% | 17.7           |

increase. The assumption that 30% of the photovoltaic production is self-consumed leaved room for further optimization.

### 3.2. Cost-Optimal levels

The outcomes of the calculation provide weighted cost-optimal levels of 59.01 kWh/m<sup>2</sup> and 50.34 kWh/m<sup>2</sup> in private and macroeconomic approaches respectively, which represent approximately half the current nr-PE consumption (116.10 kWh/m<sup>2</sup>) for thermal end-uses. These outcomes do not deviate excessively from the results of the governmental calculations at national level [17] which, according to the multi-family buildings distribution shown in the report, average optimal nr-PE consumptions of 68.1 kWh/m<sup>2</sup> and 39.0 kWh/m<sup>2</sup> in private (with a 10% discount rate) and macro (with a 4% discount rate) perspectives.

Nevertheless, the results of this study reveal that the cost-optimal nr-PE consumption varies significantly between the different RBs (Tables 11 and 12). In the private perspective, it ranges widely from 27.28 kWh/m<sup>2</sup> to 70.56 kWh/m<sup>2</sup> in RBs which consume NG and from 38.99 kWh/m<sup>2</sup> to 91.49 kWh/m<sup>2</sup> in RBs with electric thermal systems. It is worth noting that in a few cases the cost-optimal level even corresponds or approximates to the nZEB range. Therefore, despite the same climatic conditions and similar constructive solutions, it is verified that the different geometrical features, the building's contiguity level and the fuel used for thermal uses can make the cost-optimal level deviate considerably, even in the same location. It ratifies the need for a close focus when determining the cost-optimal levels of existing building stocks.

Considering the number of existing dwellings within each RB, the private cost-optimal levels would constitute a total nr-PE saving of 48.4% over the current consumption of the stock (Table 13). Nevertheless, those savings differ depending on the economic perspective and the fuel that is currently used for space heating and DHW production. Fig. 9 shows the distribution of the nr-PE savings obtained with identified cost-optimal variants. From the private perspective, the average PE savings achievable with optimal variants range from 44% in RBs that currently use NG to 54% in RBs that consume electricity. In the macroeconomic perspective, on the other hand, the achievable nr-PE savings are similar for RBs that use NG and electricity (56% and 57%, respectively), being higher in both cases than the savings of the private perspective.

Thus, the gap between the cost optimal levels of private and macroeconomic approaches is noteworthy in the case of RBs that use NG, which indicates that financial support may be needed to make certain energy efficiency investments economically interesting for the users.

In fact, it should be noted that the GC of the private optimal variants in RBs that use NG are very similar to the GC of the base cases. In many RBs, almost all post-1960 buildings, the former is even slightly higher than the latter, which means that acting on energy efficiency could turn out to be counterproductive from an economic point of view. This means that the GC of private optimal variants can be, on average, 3.3% higher than the base cases of RBs that consume NG for thermal uses. On the other hand, in the case of RBs that consume electricity for space heating, this only occurs, exceptionally, with RB 15 (as a post-1981 building, it is among the best insulated ones in the existing stock, so it is reasonable to show

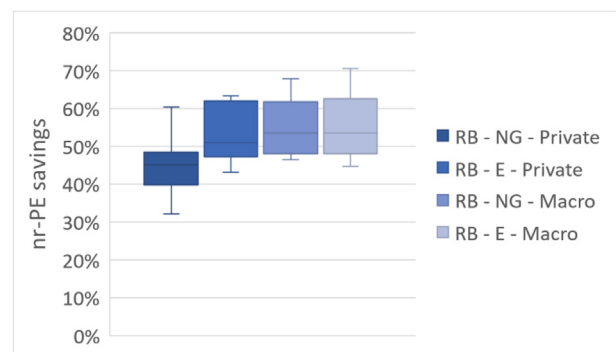
**Table 12**  
Calculated cost-optimal levels in RBs with electrical thermal systems.

|                         |         | REFERENCE SCENARIO          |               |        |             | HIGH ENERGY PRICES SCENARIO |               |        |             | BRL BASE CASE SCENARIO      |               |        |             |
|-------------------------|---------|-----------------------------|---------------|--------|-------------|-----------------------------|---------------|--------|-------------|-----------------------------|---------------|--------|-------------|
|                         |         | nr-PE (kWh/m <sup>2</sup> ) | nr-PE savings | ΔGC    | PBP (years) | nr-PE (kWh/m <sup>2</sup> ) | nr-PE savings | ΔGC    | PBP (years) | nr-PE (kWh/m <sup>2</sup> ) | nr-PE savings | ΔGC    | PBP (years) |
| Private approach        | RB 1-E  | 91.49                       | 51.1%         | -10.3% | 22.7        | 91.49                       | 51.1%         | -15.2% | 20.3        | 91.49                       | 51.1%         | -22.0% | 12.0        |
|                         | RB 2-E  | 87.80                       | 49.9%         | -10.5% | 22.7        | 87.80                       | 49.9%         | -15.2% | 20.3        | 87.80                       | 49.9%         | -22.5% | 11.4        |
|                         | RB 3-E  | 48.83                       | 62.5%         | -10.9% | 21.9        | 48.83                       | 62.5%         | -17.1% | 19.7        | 48.83                       | 62.5%         | -16.9% | 17.3        |
|                         | RB 4-E  | 44.34                       | 63.4%         | -10.4% | 22.7        | 44.34                       | 63.4%         | -16.7% | 20.3        | 44.34                       | 63.4%         | -17.5% | 17.3        |
|                         | RB 5-E  | 44.24                       | 62.4%         | -12.0% | 21.5        | 44.24                       | 62.4%         | -18.1% | 19.4        | 44.24                       | 62.4%         | -18.3% | 16.7        |
|                         | RB 6-E  | 44.12                       | 61.3%         | -10.9% | 22.2        | 44.12                       | 61.3%         | -17.0% | 19.9        | 44.12                       | 61.3%         | -17.7% | 16.9        |
|                         | RB 7-E  | 88.84                       | 46.3%         | -4.1%  | >28         | 88.84                       | 46.3%         | -9.2%  | 23.7        | 88.84                       | 46.3%         | -17.4% | 13.6        |
|                         | RB 8-E  | 86.29                       | 44.7%         | -3.9%  | >28         | 86.29                       | 44.7%         | -8.8%  | 24.0        | 86.29                       | 44.7%         | -17.7% | 13.1        |
|                         | RB 9-E  | 70.23                       | 43.2%         | -6.4%  | 23.0        | 47.16                       | 61.8%         | -10.4% | 23.3        | 70.23                       | 43.2%         | -14.7% | 14.6        |
|                         | RB 10-E | 44.56                       | 61.6%         | -8.8%  | 23.7        | 44.56                       | 61.6%         | -15.2% | 21.1        | 44.56                       | 61.6%         | -17.0% | 17.3        |
|                         | RB 11-E | 44.16                       | 52.8%         | -10.0% | 21.5        | 44.16                       | 52.8%         | -15.2% | 19.4        | 44.16                       | 52.8%         | -15.6% | 16.6        |
|                         | RB 12-E | 76.48                       | 50.9%         | -7.9%  | 24.4        | 76.48                       | 50.9%         | -13.1% | 21.6        | 76.48                       | 50.9%         | -20.7% | 12.4        |
|                         | RB 13-E | 38.99                       | 62.8%         | -8.0%  | 23.9        | 38.99                       | 62.8%         | -14.6% | 21.2        | 38.99                       | 62.8%         | -15.6% | 20.9        |
|                         | RB 14-E | 75.73                       | 50.5%         | -10.5% | 22.9        | 75.73                       | 50.5%         | -15.4% | 20.5        | 75.73                       | 50.5%         | -23.6% | 10.7        |
|                         | RB 15-E | 68.09                       | 46.6%         | 1.1%   | >28         | 68.09                       | 46.6%         | -4.6%  | >28         | 68.09                       | 46.6%         | -13.6% | 15.1        |
|                         | RB 16-E | 61.44                       | 48.1%         | -5.6%  | 24.6        | 61.44                       | 48.1%         | -10.7% | 21.7        | 61.44                       | 48.1%         | -15.5% | 15.0        |
|                         | RB 17-E | 60.48                       | 47.7%         | -1.4%  | >28         | 60.48                       | 47.7%         | -7.0%  | 24.7        | 60.48                       | 47.7%         | -14.6% | 15.3        |
| Macro-economic approach | RB 1-E  | 55.07                       | 70.6%         | -22.7% | 21.6        | 55.07                       | 70.6%         | -28.4% | 20.0        | 55.07                       | 70.6%         | -29.2% | 10.8        |
|                         | RB 2-E  | 87.80                       | 49.9%         | -23.7% | 17.9        | 41.00                       | 76.6%         | -27.3% | 22.1        | 87.80                       | 49.9%         | -30.3% | 10.4        |
|                         | RB 3-E  | 48.83                       | 62.5%         | -25.7% | 17.5        | 42.04                       | 67.7%         | -29.8% | 18.5        | 48.83                       | 62.5%         | -28.8% | 14.7        |
|                         | RB 4-E  | 44.34                       | 63.3%         | -26.0% | 17.9        | 37.71                       | 68.8%         | -30.2% | 18.8        | 44.34                       | 63.3%         | -29.8% | 14.6        |
|                         | RB 5-E  | 44.24                       | 62.4%         | -26.7% | 17.2        | 38.07                       | 67.6%         | -30.5% | 18.4        | 44.24                       | 62.4%         | -30.1% | 14.2        |
|                         | RB 6-E  | 44.12                       | 61.3%         | -25.9% | 17.6        | 37.88                       | 66.8%         | -29.7% | 18.7        | 44.12                       | 61.3%         | -29.4% | 14.4        |
|                         | RB 7-E  | 88.84                       | 46.3%         | -18.0% | 20.4        | 43.78                       | 73.5%         | -21.2% | 23.8        | 88.84                       | 46.3%         | -25.4% | 12.1        |
|                         | RB 8-E  | 86.29                       | 44.7%         | -17.6% | 20.7        | 41.19                       | 73.6%         | -19.4% | 24.6        | 86.29                       | 44.7%         | -25.3% | 11.7        |
|                         | RB 9-E  | 47.16                       | 61.8%         | -20.7% | 20.2        | 39.64                       | 67.9%         | -25.4% | 20.7        | 47.16                       | 61.8%         | -25.0% | 16.6        |
|                         | RB 10-E | 44.56                       | 61.6%         | -24.7% | 18.5        | 37.25                       | 67.9%         | -28.9% | 19.5        | 44.56                       | 61.6%         | -29.0% | 14.6        |
|                         | RB 11-E | 44.16                       | 52.8%         | -22.5% | 17.2        | 37.13                       | 60.3%         | -25.7% | 19.5        | 44.16                       | 52.8%         | -25.5% | 14.2        |
|                         | RB 12-E | 72.47                       | 53.5%         | -21.8% | 20.1        | 37.75                       | 75.8%         | -26.1% | 21.7        | 72.47                       | 53.5%         | -28.8% | 11.2        |
|                         | RB 13-E | 33.88                       | 67.7%         | -24.2% | 20.0        | 33.88                       | 67.7%         | -29.4% | 18.7        | 33.88                       | 67.7%         | -28.2% | 16.8        |
|                         | RB 14-E | 71.92                       | 53.0%         | -23.8% | 19.2        | 71.92                       | 53.0%         | -27.3% | 18.0        | 71.92                       | 53.0%         | -31.0% | 9.8         |
|                         | RB 15-E | 68.09                       | 46.6%         | -14.0% | 22.5        | 68.09                       | 46.6%         | -17.9% | 20.7        | 68.09                       | 46.6%         | -22.1% | 13.7        |
|                         | RB 16-E | 61.44                       | 48.1%         | -18.3% | 19.1        | 44.33                       | 62.6%         | -21.2% | 21.0        | 61.44                       | 48.1%         | -23.8% | 13.1        |
|                         | RB 17-E | 60.48                       | 47.7%         | -15.8% | 21.2        | 60.48                       | 47.7%         | -19.6% | 19.7        | 60.48                       | 47.7%         | -23.1% | 13.3        |

less room for energy efficiency improvement). These results suggest that the combination of Bilbao's mild winters (in comparison with the more severe climates of other inland regions) and the financial costs that are needed to afford the investments, together with the low NG prices (in comparison with electricity), could make the economic benefit of acting on energy efficiency worthless.

As an example, Fig. 10 shows the GC distribution of certain variants corresponding to RBs 14. In RB14 - NG, it is verified that the cost-optimal variant implies a higher GC than the base case, so the energy cost reduction obtained does not overcome the required investment cost. In contrast, higher electricity prices push up the energy costs of RB14 - E, leading the cost-optimal variants to involve a GC saving over the base case. This GC saving, is in any case, limited among the different RBs with electric thermal systems: the mean GC saving of private cost-optimal variants is 7.7%.

Furthermore, in RBs which consume NG, the private GC curve is mainly flat in a wide range around the cost-optimal variant, in which the GC deviation, either above or below the base case GC,



**Fig. 9.** Distribution of nr-PE savings obtained with identified cost-optimal variants.

is low. Fig. 11 shows the curve obtained for RB 1 as an example. It means that, without requiring excessive public support, signifi-

**Table 13**  
Weighted averages for cost-optimal levels obtained under the different scenarios.

|                        | Reference Scenario | High Energy Prices Scenario | BRL Base Case Scenario |
|------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|
| Private approach       | nr-PE savings      | 48.4%                       | 48.4%                  |
|                        | GHG savings        | 46.7%                       | 46.7%                  |
|                        | GC savings         | 1.97%                       | 13.2%                  |
| Macroeconomic approach | nr-PE savings      | 57.1%                       | 57.1%                  |
|                        | GHG savings        | 56.2%                       | 56.2%                  |
|                        | GC savings         | 16.2%                       | 22.3%                  |

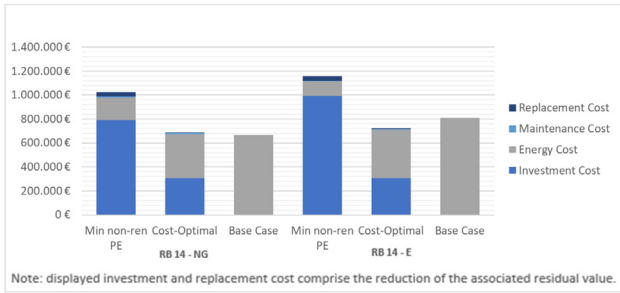


Fig. 10. GC distribution of certain variants corresponding to RB 14 – NG and RB 14 – E. Time horizon: 28 years.

cant nr-PE savings could be fostered by making the intervention variants located at the left edge of the flat curve marginally attractive to the users. In any case, for the sake of establishing the cost-optimal level, the Delegated Regulation stipulates that if several variants have a similar GC, the variant with the lowest primary use should be selected, as has been done in the present analysis.

Conversely, within the same private perspective, the obtained clouds of points and derived cost curves corresponding to the RBs that use electricity for space heating show an appreciably different shape. In general, a higher number of variants fall below the GC of the base case, the curve is slightly more inclined along the right side of the cost-optimal area and the latter locates farther from the base case point, meaning that it involves a higher nr-PE saving. Those aspects can be verified in Fig. 12, which shows the results of RB 5-E.

Nevertheless, the PBPs corresponding to the cost-optimal variants are still excessive, being above 21 years for all the RBs. In some cases, they are even higher than the 28 years' time period considered within the application of the cost-optimal methodology, meaning that it is the obtained residual value at the end of the said period which makes some cost-optimal variants constitute a lower GC than the associated base cases.

The darker points in Fig. 12 refer to the variants that involve a substitution of the existing electric heating systems by a complete installation consisting of a new NG supply, condensing boiler and radiator system. This potential new installation makes the GC of related variants increase in a way that allows, for the majority of the RBs, them to be graphically distinguished from the other variants. Nevertheless, it is worth noting that only with this new NG installation could the CTE's nZEB consumption levels be reached by these buildings.

On the other hand, the macroeconomic perspective involves different cost-optimal variants in most of the RBs which consume NG. These variants entail lower nr-PE consumptions than in the private approach. In this macro approach, the cost-optimal area is more pronounced, implying an appreciable GC saving over the base case in all RBs, and the trend of the almost flat GC curve does not occur anymore. By contrast, in the RBs that use electricity for space heating, the macroeconomic perspective is more aligned with the private approach, providing in general the same cost-optimal results. Nevertheless, the macro approach gives in all cases lower – although still high – PBPs: above 21 and 17 years in RBs which consume NG and electricity respectively. In summary, the weighted nr-PE and GC saving averages increase to 57.1% and 16.23%, respectively, with cost-optimal variants obtained in the macroeconomic perspective (Table 13).

### 3.3. nZEB refurbishment levels

The maximum achievable nr-PE savings through energy retrofitting fall within the order of magnitude of the European energy consumption reduction target for 2050. In RBs that use NG as heating fuel, an average saving of 76% over the base cases could be reached (ranging from 69% to 84%, depending on the RB). Such a potential PE saving rises to 82% in RBs with electric heating systems (varying between 77% and 88%, depending on the RB). These results are depicted in Fig. 13, in which the size of the circles refers to the existing amount of each type of RB. All RBs would be able to meet the threshold value set by the CTE DB HE for new buildings, meaning that in all the cases, the existing buildings could, by means of a deep energy refurbishment, become nZEB as per the Spanish definition.

Nevertheless, the necessary private GC increase over the private base cases would be huge: an additional economic effort of around 54% would be needed, with a very similar average for RBs that use NG and electricity. By contrast, it is worth noting that this weighted GC increase is significantly lower in the macro assessment, i.e., 15%. Therefore, there is a relevant gap in the economic impact of deep energy interventions between both perspectives. From a macroeconomic perspective, there are even several RBs that require a small GC increase (although by concentrating and advancing it as an upfront investment) to become nZEB.

However, the effectiveness of such an economic effort would be unequal in terms of the obtained nr-PE unit savings per euro invested. Fig. 14 shows the necessary GC increase per saved nr-PE unit, depicted against the achievable nr-PE savings per retrofitted dwelling. The obtained “euro per saved kilowatt-hour” ratios

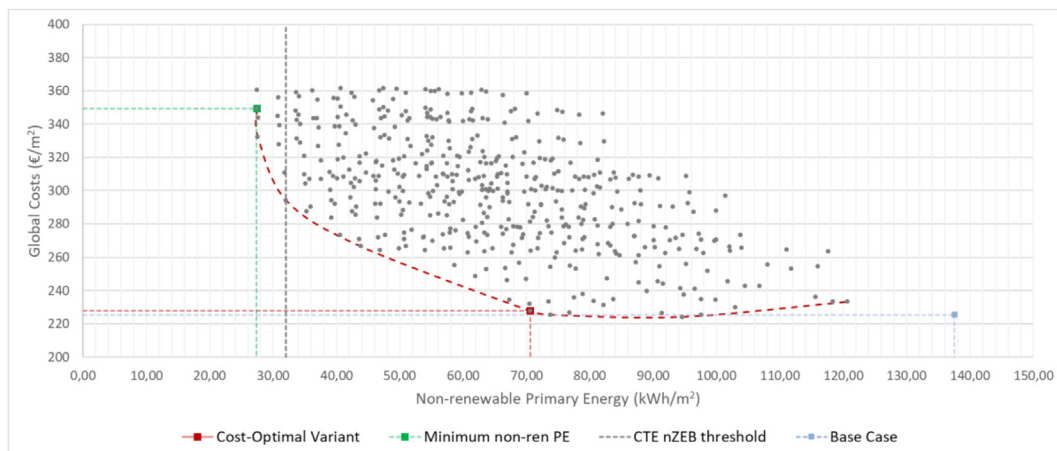


Fig. 11. GC curve obtained for RB 1 – NG.

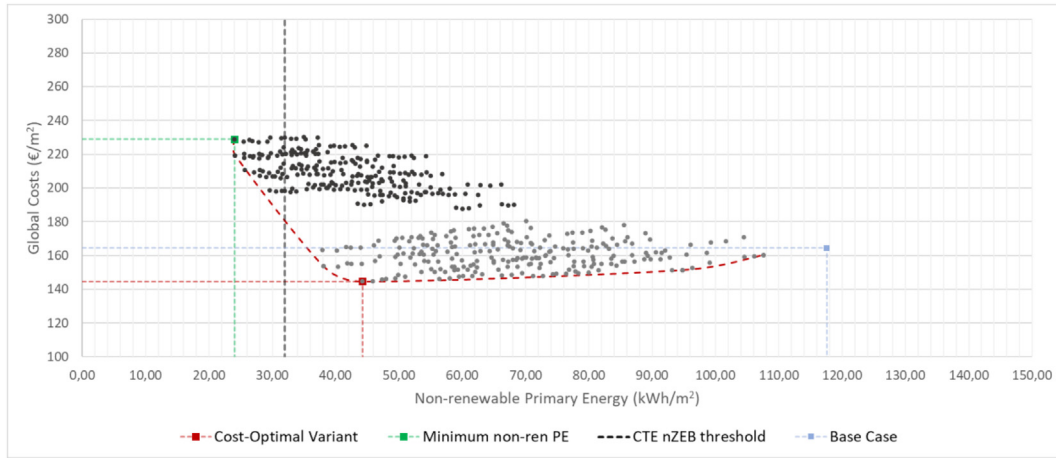


Fig. 12. GC curve obtained for RB 5 - E.

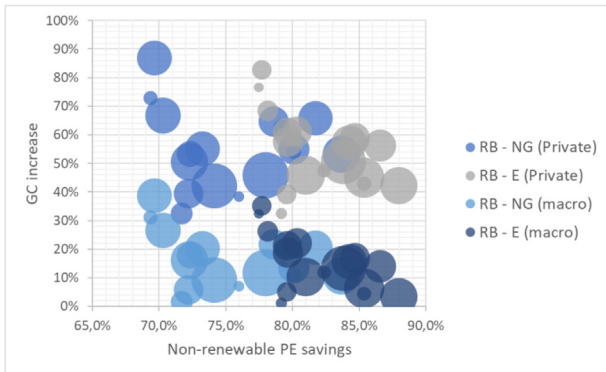


Fig. 13. Maximum achievable nr-PE savings through energy retrofitting, mapped against the associated GC increase.

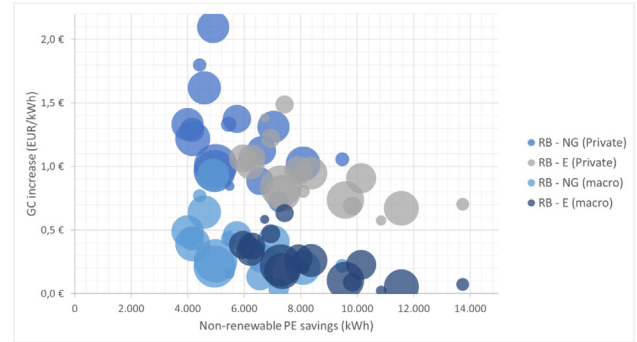


Fig. 14. Required GC increase per saved nr-PE unit, depicted against the nr-PE savings per retrofitted dwelling.

range between 2.1 and 93.6 cents in the macroeconomic approach, with the oldest and most recent RBs in the lower and upper ranges respectively. On the other hand, the lowest ratio obtained in the private assessment is above 50 cents, while the current costs of electricity or NG per kilowatt-hour of consumed nr-PE can be estimated as 6.5 and 5.6 cents, respectively, i.e., almost ten times lower.

These results could inform public support schemes that may be required to encourage an energy efficiency improvement level actually aligned with the long-term energy saving objectives. However, it is relevant to highlight that, even from a macroeconomic perspective, the achievement of nZEB refurbishment levels would not be cost-effective within the assumed reference scenario. The framework that could eventually make these deep interventions profitable would necessarily involve a reduction in investment costs (due to learning curves and economies of scale), higher than expected energy commodity prices and lower financing interests at the same time.

### 3.4. High energy prices scenario

A sensitivity analysis has been carried out to investigate the influence of the evolution of the NG and electricity prices on the results. Thus, an alternative scenario with higher energy prices is defined, while the rest of the model parameters remain fixed.

According to [73], the average annual electricity price increase in Spain along the 2011–2018 period was 3.2%. Nevertheless, the mean annual increment that arises from the reference scenario is

1.82%. Therefore, a constant annual increase of 3% is defined in the alternative scenario. Concerning GN, the projection to 2030 considered in the Spanish National Energy and Climate Plan (NECP) [75] involves a substantially greater commodity cost evolution than the rest of the relevant analyses considered in the determination of the reference scenario. Although such a huge price increase seems not to be supported by relevant market analysts [94], an intermediate NG price evolution, between the reference scenario and the NECP's assumption, is defined in the alternative scenario. Both alternative commodity price evolutions are presented in Fig. 5.

The resulting cost-optimal levels achieved for RBs which use NG for thermal uses are the same as in the reference scenario in private and macro approaches (Table 11), so the gap between both perspectives persists. At best, the PBPs are modestly improved (by approximately 1.5 years), but certain RBs remain in which even acting on cost-optimal levels, they would continue to be cost-ineffective. Therefore, the results show a limited effect of the higher NG price.

In RBs that are electricity consumers, the private cost-optimal levels follow the same pattern and it is only changed in RB9 - E (Table 12). The PBPs are in general slightly improved by 2–3 years. Nevertheless, the relevant impact is on macroeconomic cost-optimal levels, which are generally shifted to lower nr-PE consumption ranges. Therefore, while the private and macroeconomic cost-optimal levels were in general aligned in the reference scenario, a notable gap emerges (similar to that of RBs which use NG) between both perspectives in the alternative scenario.

### 3.5. Base refurbishment level scenario

In the reference scenario, the base cases represent the RBs without any kind of retrofitting. Nevertheless, there may be circumstances in which an old building faces a necessary and unavoidable maintenance intervention. In such a situation, the economic framework to evaluate the cost-effectiveness of substitute EEMs changes. Thus, a baseline retrofitting level (BRL) of intervention is defined in RBs' base cases, which represent the minimum level of façade renovation applicable to a building in need of restoration. A very commonly used refurbishment method of external walls in Spain is selected to be considered as an inevitable expense in these base cases, consisting of an exterior covering of 15 mm of single-layer mortar. Although its impermeable and breathable properties provide good hygrothermal façade behaviour, it does not improve the thermal insulation of the façade. A cost of 35 €/m<sup>2</sup> is considered for this BRL.

In this scenario, the nr-PE consumption and GC of all the variants remain the same as in the reference scenario (it only changes the GC of the base case), so the GC graph does not change and the cost-optimal levels are those of the reference scenario (Tables 12 and 13). Nevertheless, the cost-effectiveness evaluation of the cost-optimal levels is modified, due to the increase in the expense of the base cases, and significant PBP reductions are observed over the reference scenario. In this case, cost-optimal levels are highly cost-effective in all the RBs, with private PBPs between 14 and 23 years for NG consumers (12–18 years in the macro approach) and 11–17 years for RBs that consume electricity for thermal uses (10–15 years in the macro approach). It is therefore verified that the profitability of more profound energy refurbishments is highly suggestive in a context where a building requires a façade rehabilitation.

### 3.6. Subsidies

The results presented in the previous sections constitute a refurbishment scenario where noticeable gaps exist between macroeconomic and private economic outcomes, some interventions are not cost-effective for the private investor and, when profitable, the PBPs of such investments prove to be excessively high. All this demonstrates the necessity for public aid to make energy retrofitting sufficiently attractive to the public.

Fig. 15 depicts the weighted average of the investment grant required for acting on the calculated macroeconomic cost-optimal levels and obtaining distinct target private PBPs. An iterative process has been carried out by increasing the level of subsidies and checking at each step if the desired PBP is achieved. The introduction of each degree of subsidy would obviously make the optimal level of the private approach vary continuously, so the present analysis focuses on the obtained macroeconomic cost-optimal ranges, which are fixed. The calculation has been done twice for every RB, one for the reference financing rate of 4% and one for a reduced – soft loan – rate of 2%.

Although ideally a near 10-year PBP should be intended to make an investment sufficiently attractive to a domestic investor, the results suggest that, in the defined reference scenario, the fastest investment return that could be extensively promoted would have to be limited to around 15 years. The mean public grants that this target PBP would require are already huge, but pointing closer to 10-year PBPs makes the covered investment shares escalate steeply.

On the other hand, the results show the value of combining direct grants with low-interest loans. The contribution of the latter is demonstrated as being essential to reduce the outlay of direct subsidies to a range comparable to previous public support programs, in which the aid could typically reach up to 30–35% of

the investment [95]. With a finance rate of 2%, the weighted average subsidy required in the reference scenario is 38%.

Nevertheless, significant differences exist between the public grant required by each RB to ensure a PBP below 15 years for their cost-optimal level intervention. Fig. 16 maps the share of subsidy needed by each RB, assuming a financing rate of 2%, against the nr-PE savings that such energy retrofitting would imply. The size of the circles refers to the existing number of dwellings.

It is verified that the need for public support of RBs with electric thermal systems is notably lower than in RBs which consume NG. While in the former such support falls within usual subsidized rates, in the latter it escalates to an average of 48% of the investment. The lower NG price in comparison with electricity (currently the variable – energy – term of the bill is approximately half for NG in relation to electricity as shown in Table 10), leads to lower annual energy expenses in RBs which consume NG for thermal end-uses in comparison with RBs with electric thermal systems. Consequently, the economic savings associated with a given energy consumption reduction are lower for NG consumers, which leads to larger PBPs for similar energy efficiency investments. The main consequence is the need for higher subsidies to make the energy efficiency investments attractive enough for the end-user.

The defined high prices scenario shows a similar subsidy distribution for 15 years PBP, as can be observed in Fig. 17. Although the macroeconomic optimums of this scenario involve higher energy savings than in the reference scenario (Table 13), the required subsidies are similar in both scenarios. In contrast, the required support in the BRL scenario is notably reduced, with several RBs which do not demand any public aid to ensure a PBP of 15 years.

Aiming to estimate the additional governmental support that may be needed for more profound interventions, a deeper level of energy refurbishment is selected for each RB. While still being within or near nZEB range, this represents a suitable compromise between savings and costs. The required subsidy distribution to achieve such levels of interventions, with which a weighted nr-PE average consumption of 36.0 kWh/m<sup>2</sup> would be obtained, is shown in Fig. 17 for each of the three scenarios.

It is worth noting that, in the high prices scenario, the mean subsidy (43%) gets close to the average aid needed for cost-optimal levels in the reference and high prices scenarios. This means that the energy commodities cost could have a significant impact on making the nZEB level interventions subsidizable. On the other hand, the latter would be ensured, at a reasonable mean public aid of 25%, in buildings in need of restoration.

Nevertheless, if the main target is to reduce GHG emissions caused by domestic energy consumption, it may not be worthwhile promoting deep – nZEB level – interventions in RBs with electric thermal systems. On the one hand, the GHG emission savings that would be achieved with macroeconomic cost-optimal interventions reach a worthy 56.2%. On the other hand, the planned power

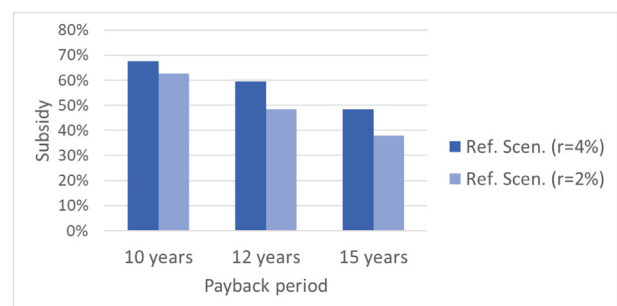


Fig. 15. Weighted average subsidies required to ensure distinct private PBPs macroeconomic cost-optimal levels.

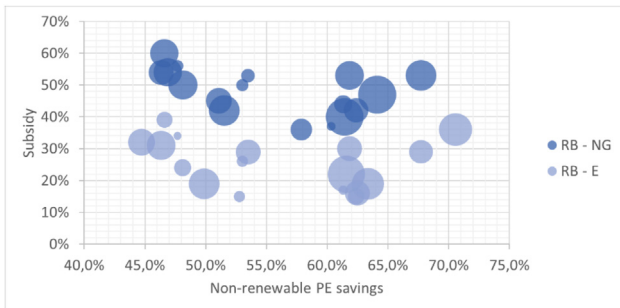


Fig. 16. Subsidies needed in the private approach with a financing rate of 2% to ensure 15 years PBP of cost-optimal interventions.

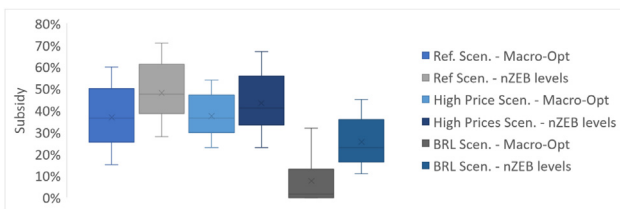


Fig. 17. Grants distribution for a 15 years PBP.

grid decarbonization would itself minimize the emissions associated with the remaining PE consumption. Based on the Spanish electricity mix depicted by [75] for 2030, a conversion factor of 0.08 kgCO<sub>2</sub>/ kWh<sub>FE</sub> can be estimated for consumed domestic electricity, which constitutes a quarter of the present factor. Therefore, this driver could align a cost-optimal intervention with the long-term emission reduction target of 80–90%.

4. Conclusions

Economic evaluations of EEMs are often based on a single building or type of building, which cannot be scaled-up to an existing building stock. In other cases, the limited number of RBs defined to represent a large building stock hinders the capture of the existing great heterogeneity into sufficiently homogeneous building typologies to allow a reliable extrapolation of the assessment results. The present paper proposes the application of the cost-optimal approach at city level and investigates the cost-optimal levels for the residential building stock of Bilbao under different scenarios. The vast portfolio of defined RBs assures a tailored characterization of the residential building stock which allows the suitable range of energy performance that is reasonable to promote for different types of buildings to be identified.

The approach incorporates proven EEMs in the form of envelope improvements, active system retrofits and renewable use. Optimum external façade insulation of 7–8 cm is observed. In general, the cost-optimal levels of buildings with electric thermal systems appear to be made up of a combination of both façade external insulation and solar thermal collectors sized to cover 60% of DHW demand. On the other hand, the cost-optimal benchmarks for buildings that are NG consumers are more heterogeneous: in some cases, they are made up of the external insulation of the building’s façade only, while in others they are combinations of the latter with either solar thermal collectors or photovoltaic systems. The latter show a similar result in the defined reference scenario, but as the exploitation of PV is optimized, the benefits of such a system over the solar thermal collectors would accordingly increase.

The outcomes of the calculation provide weighted cost-optimal levels of 59.01 kWh/m<sup>2</sup> and 50.34 kWh/m<sup>2</sup> in private and macroeconomic approaches respectively, which represent half of the current nr-PE consumption for thermal end-uses (116.10 kWh/m<sup>2</sup>). Nevertheless, the results reveal that the cost-optimal nr-PE consumption varies significantly between the different RBs, due to the distinct geometrical characteristics, the level of the building’s contiguity and the fuel used for thermal uses. It demonstrates the need for a close focus when determining the cost-optimal levels of the existing building stocks, as those levels could guide the energy efficiency policy and related economic instruments. Even more so considering that, in decentralized countries like Spain, the latter are often largely set (or complemented) domestically by regional authorities.

In fact, the gap between the cost-optimal levels of private and macroeconomic approaches, which is limited to the RBs that use NG in the reference scenario and extends to the RBs with an electric system in the high energy prices scenario, indicates that public support may be needed to realign the private investor interest with society’s.

Furthermore, financial support is proven to be essential to reduce the obtained long private PBPs, which are above 21 years for all cost-optimal levels of the RBs, and thus make such energy retrofitting sufficiently attractive for the domestic user. In most of the RBs that use NG, the GC of the private optimal variants are very similar to the GC of the base cases (or even slightly higher), which suggests that the combination of the mild climate of Bilbao, the financial costs needed to afford the investments and low NG prices prevent action on the energy efficiency of a building from being economically interesting for a private investor.

Nevertheless, in certain situations where an existing building requires a façade maintenance retrofit, the incentive to intervene on energy efficiency increases substantially. The corresponding GC savings improve sufficiently to constitute a unique occasion for enhancing the energy performance of a building, in many cases even without the need for public aid to ensure a reasonable PBP. This highlights the fact that ensuring appropriate access to information about viable energy efficiency measures is essential in order to seize the opportunity.

Otherwise, usual ranges of public grants could only achieve an average reduction of the cost-optimal level’s private PBP to around 15 years. In buildings which use NG, such a PBP would inevitably be higher. On the other hand, it is quantitatively verified that soft loans play a pivotal role in reducing the need for direct support.

Although the calculated optimal energy refurbishment solutions entail a broad potential for nr-PE savings (48.4%) over the current consumption of the residential stock, it is still far from the European targets for 2050. In a context of international calls for promoting nZEB buildings, it leads to the crucial question of whether maximising the economic performance would actually allow a far enough reach concerning the main aim of reducing CO<sub>2</sub> emissions and related environmental damage; in other words, whether the economic approach could somehow relegate the environmental perspective to a second place. Nevertheless, the cost-optimal methodology constitutes an instrument which enables us to identify the framework conditions that must be improved to encourage building energy retrofitting towards more ambitious environmental goals.

In this sense, the role of renewable energy sources is proven to be fundamental toward the achievement of nZEB levels: as long as they are not used, the performance of the retrofitted buildings is, in all cases, still far from reaching the nZEB ranges. On the other hand, the results suggest that the combination of proven passive and active EEMs, together with renewable technologies, is sufficient to transform all the existing buildings into nZEB. To this effect, the recent Spanish self-consumption regulation represents a rele-

vant step forward, which in the authors thinking should be followed by a simplification of the administrative process to encourage neighbourhood communities to adhere to the new legal figures.

Nevertheless, it is worth noting that a relevant paradox exists concerning the most appropriate fuel that should be promoted to comply with long-term environmental targets. While the outcomes of the study show that the buildings which satisfy the thermal end-uses through electrical consumption could only reach nZEB levels by changing the domestic thermal system to NG, the planned power grid decarbonization could turn electricity into the preferable fuel, and this will probably depend on its future price evolution.

In summary, this work aims to assist policymakers in outlining the most suitable long-term policy and determining the priority targets that require the mobilisation of investment for the energy refurbishment of the existing residential building stock. The conducted research helps to evaluate the achievable energy consumption savings under different retrofitting scenarios. In addition, the outcomes of the analysis can inform the formulation of an energy efficiency policy through the assessment of the impact of economic incentives that could foster private investments in energy refurbishment.

Nevertheless, the application of the methodology from a private approach involves the assumption of a typical mean end-user. On the one hand, it could hide relevant socioeconomic disparities between different residents. On the other hand, each occupant could value the numerous benefits that energy refurbishment involves in a different way, so the willingness to pay for energy efficiency measures could significantly vary from case to case. Therefore, the authors believe that a further family income analysis, together with a discrete choice experiment aimed at shedding some light on motivations to invest in energy efficiency, could interestingly complement the present study for the development of a tailored support scheme that could allocate public resources most efficiently.

### CRedit authorship contribution statement

**Jon Fernandez-Luzuriaga:** Methodology, Investigation, Data curation, Writing - review & editing. **Luis del Portillo-Valdes:** Conceptualization, Supervision. **Iván Flores-Abascal:** Resources, Validation, Visualization.

### Declaration of Competing Interest

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

### Acknowledgement

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

### References

- [1] European Commission (EC). Clean energy for all Europeans package (2020) [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans\\_en#energy-performance-in-buildings](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en#energy-performance-in-buildings) [accessed 15.05.2020].
- [2] European Commission (EC). Energy Roadmap 2050 [COM/2011/885]. 2011.
- [3] European Commission (EC). A Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. 2018.
- [4] IDAE. Tendencias y políticas de eficiencia energética en España. Informe Nacional para el Proyecto ODYSSEE-MURE. 2018.
- [5] S. Barlow, D. Fiala, Occupant comfort in UK Offices – how adaptive comfort theories might influence future low energy office refurbishment strategies, *Energy Build.* 39 (2007) 837–846.
- [6] Z. Ma, P. Cooper, D. Daly, L. Ledo, Existing building retrofits: methodology and state-of-the-art, *Energy Build.* 55 (2012) 889–902.
- [7] O. Pombo, B. Rivela, J. Neila, The challenge of sustainable building renovation: assessment of current criteria and future outlook, *J. Cleaner Prod.* 123 (2016) 88–100.
- [8] R. Jagarajan, M.N.A.M. Asmoni, A.H. Mohammed, M.N. Jaafar, J.L.Y. Mei, M. Baba, Green retrofitting – A review of current status, implementations and challenges, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67 (2017) 1360–1368.
- [9] C. Koulamas, A.P. Kalogeras, R. Pacheco-Torres, J. Casillas, L. Ferrarini, Suitability analysis of modelling and assessment approaches in energy efficiency in buildings, *Energy Build.* 158 (2018) 1662–1682.
- [10] M. Ferreira, M. Almeida, A. Rodrigues, Cost-optimal energy efficiency levels are the first step in achieving cost effective renovation in residential buildings with a nearly-zero energy target, *Energy Build.* 133 (2016) 724–737.
- [11] Guardigli, L.; Bragadin, M.A.; Della Fornace, F.; Mazzoli, C.; Prati, D. Energy retrofit alternatives and cost-optimal analysis for large public housing stocks, *Energy and Buildings*, 2018, vol. 166, pp. 48–59.
- [12] M. Villca-Pozo, J.P. Gonzalez-Bustos, Tax incentives to modernize the energy efficiency of the housing in Spain, *Energy Policy* 128 (2019) 530–538.
- [13] Official Journal of the European Union. Directive 2010/31/EU. 19th May 2010.
- [14] Official Journal of the European Union. Commission Delegated Regulation (EU) No. 244/2012. 16th January 2012.
- [15] Official Journal of the European Union. Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 (2012/C 115/01). 19th April 2012.
- [16] Ministry of Public Works. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE. Ahorro de energía. December 20th, 2019.
- [17] Ministry of Public Works. Report on the calculation of the cost-optimal levels of the minimum energy performance requirements for buildings in the new Spanish regulations and their comparison with the current requirements. July 2018.
- [18] S. Aguacil, S. Lufkin, E. Rey, A. Cuchi, Application of the cost-optimal methodology to urban renewal projects at the territorial scale based on statistical data – A case study in Spain, *Energy Build.* 144 (2017) 42–60.
- [19] BRANDAO DE VASCONCELOS, A.; PINHEIRO, M.D.; MANSO, A.; CABAÇO, A. Portuguese approach to define reference buildings for cost-optimal methodologies, *Applied Energy*, 2015, vol. 140, pp. 316–328.
- [20] I. Ballarini, V. Corrado, F. Madonna, S. Paduos, F. Ravasio, Energy refurbishment of the Italian residential building stock: energy and cost analysis through the application of the building typology, *Energy Policy* 105 (2017) 148–160.
- [21] P. Pallis, N. Gkonis, E. Varvagiannis, K. Braimakis, S. Karellas, M. Katsaros, P. Vourliotis, Cost effectiveness assessment and beyond: a case study on energy efficiency interventions in Greek residential building stock, *Energy Build.* 182 (2019) 1–18.
- [22] G.M. Mauro, M. Hamdy, G.P. Vanoli, N. Bianco, J.L.M. Hensen, A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category, *Energy Build.* 107 (2015) 456–478.
- [23] K. Kuusk, T. Kalamees, M. Maivel, Cost effectiveness of energy performance improvements in Estonian brick apartment buildings, *Energy Build.* 77 (2014) 313–322.
- [24] V. Corrado, I. Ballarini, S. Paduos, Assessment of cost-optimal energy performance requirements for the Italian residential building stock, *Energy Procedia* 45 (2014) 443–452.
- [25] N.G. Saglam, A.Z. Yilmaz, C. Becchio, S.P. Corgnati, A comprehensive cost-optimal approach for energy retrofit of existing multi-family buildings: application to apartment blocks in Turkey, *Energy Build.* 150 (2017) 224–238.
- [26] T. Niemela, R. Kosonen, J. Jokisalo, Energy performance and environmental impact analysis of cost-optimal renovation solutions of large panel apartments buildings in Finland, *Sustain. Cities Soc.* 32 (2017) 9–30.
- [27] C. Carpino, R. Bruno, N. Arcuri, Social housing refurbishment for the improvement of city sustainability: Identification of targeted interventions based on a disaggregated cost-optimal approach, *Sustain. Cities Soc.* 60 (2020) 102223.
- [28] G. Kumburoglu, R. Madlener, Evaluation of economically optimal retrofit investment options for energy savings in buildings, *Energy Build.* 49 (2012) 327–334.
- [29] C. Becchio, D.G. Ferrando, E. Fregonara, N. Milani, C. Quercia, V. Serra, The cost optimal methodology for evaluating the energy retrofit of an ex-industrial building in Turin, *Energy Procedia* 78 (2015) 1039–1044.
- [30] E. de Angelis, G. Pansa, E. Serra, Research of economic sustainability of different energy refurbishment strategies for an apartment block building, *Energy Procedia* 48 (2014) 1449–1458.
- [31] M. Ferrara, E. Fabrizio, J. Virgone, M. Filippi, Appraising the effect of the primary systems on the cost-optimal design of nZEB: a case study in two different climates, *Energy Procedia* 78 (2015) 2028–2033.
- [32] L. la Fleur, P. Rohdin, B. Moshfegh, Investigating cost-optimal energy renovation of a multifamily building in Sweden, *Energy Build.* 203 (2019) 109438.



- [33] Y. Chen, T. Hong, M.A. Piette, Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis, *Appl. Energy* 205 (2017) 323–335.
- [34] C. Delmastro, G. Mutani, S.P. Corgnati, A supporting method for selecting cost-optimal energy retrofit policies for residential buildings at the urban scale, *Energy Policy* 99 (2016) 42–56.
- [35] L. Liu, P. Rohdin, B. Moshfegh, Investigating cost-optimal refurbishment strategies for the medieval district of Visby in Sweden, *Energy Build.* 158 (2018) 750–760.
- [36] Martínez Garriga, S.; Dabbagh, M.; Krarti, M. Optimal carbon-neutral retrofit of residential communities in Barcelona, Spain, *Energy and Buildings*, 2020, vol. 2020, 109651.
- [37] Ali, U.; Haris Shamsi, M.; Bohacek, M.; Hoare, C.; Purcell, K.; Mangina, E.; O'DONNELL, J. A data-driven approach to optimize urban scale energy retrofit decisions for residential buildings, *Applied Energy*, 2020, vol 267, 114861.
- [38] L. Aelenei, S. Paduos, H. Petran, J. Tarres, A. Ferreira, V. Corrado, S. Camelo, E. Polychroni, K. Sfakianaki, H. Gonçalves, J. Salon, G. Riva, G. Murano, Implementing cost-optimal methodology in existing public buildings, *Energy Procedia* 78 (2015) 2022–2027.
- [39] P. Zangheri, R. Armani, M. Pietrobon, L. Pagliano, Identification of cost-optimal and NZEB refurbishment levels for representative climates and building typologies across Europe, *Energ. Eff.* 11 (2017) 337–369.
- [40] D. D'Agostino, D. Parker, A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (nZEBs) in representative climates across Europe, *Energy* 149 (2018) 814–829.
- [41] Aparicio Ruiz, P.; Guadix Martin, J.; Salmerón Lissén, J.M.; Sánchez DE LA FLOR, F.J. An integrated optimisation method for residential building design: A case study in Spain, *Energy and Buildings*, 2014, vol. 80, pp. 158–168.
- [42] POMBO, O.; RIVELA, B.; NEILA, J. Life cycle thinking toward sustainable development policy-making: The case of energy retrofits, *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 206, pp. 267–281.
- [43] D'AGOSTINO, D.; DE ROSSI, F.; MARIGLIANO, M.; MARINO, C.; MINICHELLO F. Evaluation of the optimal thermal insulation thickness for an office building in different climates by means of the basic and modified "cost-optimal" methodology, *Journal of Building Engineering*, 2019, vol. 24, 100743.
- [44] IDAE. Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. 2011.
- [45] J. Fernandez, L. del Portillo, I. Flores, A novel residential heating consumption characterization approach at city level from available public data: Description and case study, *Energy Build.* 221 (2020) 110082.
- [46] DesignBuilder simulation tool. DesignBuilder Software Ltd, UK. Available online: <https://designbuilder.co.uk>
- [47] System Advisor Model (SAM) software. NREL. Available online: <https://sam.nrel.gov>.
- [48] EVE. Claves energéticas del sector doméstico en Euskadi. 2013.
- [49] IDAE. SPAHOUSEC II: Análisis estadístico del consumo de gas natural en las viviendas principales con calefacción individual. 2019.
- [50] INE (Spanish National Institute of Statistics). 2011 Population and Housing Census [Online]. Available: <https://www.ine.es/censos2011/tablas/Inicio.do> [accessed 02.04.2020]
- [51] INE (Spanish National Institute of Statistics). 2001 Population and Housing Census [Online]. Available: <http://www.ine.es/censo/es/Inicio.jsp> [accessed 05.04.2020]
- [52] D. George, N.S. Pearre, L.G. Swan, High resolution measured domestic hot water consumption of Canadian homes, *Energy Build.* 109 (2015) 304–315.
- [53] A.S. Vieira, C.D. Beal, R.A. Stewart, Residential water heaters in Brisbane, Australia: Thinking beyond technology selection to enhance energy efficiency and level of service, *Energy Build.* 82 (2014) 222–236.
- [54] Department for Environment, Food and Rural Affairs. Measurement of Domestic Hot Water Consumption in Dwellings. 2008.
- [55] J.C. Everts, L.G. Swan, Domestic hot water consumption estimates for solar thermal system sizing, *Energy Build.* 58 (2013) 58–65.
- [56] Ministry of Public Works, Código Técnico de la Edificación, Documento Básico HE, Ahorro de energía, June 2017.
- [57] Passive House Institute. Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard. 2016.
- [58] Ministry of Housing. Catálogo de Elementos Constructivos del CTE. January 2010.
- [59] G. Luddeni, M. Krarti, G. Pernigotto, A. Gasparella, An analysis methodology for large-scale deep energy retrofits of existing building stocks: Case study of the Italian office building, *Sustain. Cities Soc.* 41 (2018) 296–311.
- [60] JIMENEZ TIBERIO, A.; EMILIO BRANCHI, P. Análisis de la estanqueidad al aire en la construcción y rehabilitación energética de edificios de viviendas, *CSCAE Anexo*, 2015, n.17, p.12.
- [61] A. Meiss, J. Feijo-Muñoz, M.A. Evaluación Padilla-Marcos, diseño y propuestas de sistemas de ventilación en la rehabilitación de edificios residenciales españoles. Estudio de caso, *Informes de la Construcción* vol 68 (2016) No 542.
- [62] E. Barreira, R.M.S.F. Almeida, M. Moreira, An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings, *Energy Build.* 140 (2017) 224–235.
- [63] C.E. Rodriguez-Jimenez, M.J. Carretero-Ayuso, J.C. Claro-Ponce, Influencia de las infiltraciones en la rehabilitación energética de la envolvente. El caso del plan de actuaciones en el parque público residencial de Andalucía, *Informes de la Construcción* 70 (2018) No 551.
- [64] KLEIN, S.A.; BECKMAN W.A.; DUFFIE, J.A. A design procedure for solar heating systems, *Solar Energy*, 1976, vol 18, pp. 113–127.
- [65] DIORIO N.; CHRISTENSEN, C.; BURCH, J.; DOBOS, A. Technical Manual for the SAM Solar Water Heating Model. March 31, 2014.
- [66] IEA ECBCS Programme, Annex 42. European and Canadian non-HVAC Electric and DHW Load Profiles for Use in Simulating the Performance of Residential Cogeneration Systems. May 2007.
- [67] NREL. Development of Standardized Domestic Hot Water Event Schedules for Residential Buildings. August 2008.
- [68] A. Bertrand, A. Mastrucci, N. Schuler, R. Aggoune, F. Marechal, Characterisation of domestic hot water end-uses for integrated urban thermal energy assessment and optimization, *Appl. Energy* 186 (2017) 152–166.
- [69] E. Fuentes, L. Arce, J. Salom, A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 (2018) 1530–1547.
- [70] NREL. SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update. March 2018.
- [71] CYPE Ingenieros. Database of Construction Products and Systems. Available: <http://www.generadordeprecios.info> [accessed 07.03.2020].
- [72] Basque Government. Construction and Urbanization Prices Database. Available: <http://www.euskadieuprecios.com/> [accessed 02.03.2020].
- [73] CNMC, Informe de supervisión del mercado minorista de electricidad, Año (2018. 2019.).
- [74] European Commission. Energy prices and costs in Europe. 2019.
- [75] Ministry of Ecological Transition and Demographic Challenge. Integrated National Energy and Climate Plan 2021–2030. January 20, 2020.
- [76] METIS Studies. Study S14. Wholesale market prices, revenues and risks for producers with high shares of variable RES in the power system. 2018.
- [77] E.U. European Commission, Reference Scenario, Energy, transport and GHG emissions, Trends to 2050 (2016) 2016.
- [78] Boletín Oficial del Estado. Real Decreto-ley 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de los consumidores. 6th October 2018.
- [79] Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. 6th April 2019.
- [80] I.D.A.E. Guía, Profesional de Tramitación del Autoconsumo. (2019).
- [81] CNMC. Informe de supervisión del mercado de gas natural en España. Periodo: año 2018. 2019.
- [82] European Commission. EU Energy, transport and GHG emissions. Trends to 2050. Reference Scenario 2013. 2013.
- [83] ENTSOG. TYNDP 2020 Scenario Report. 2019.
- [84] IEA. World Energy Outlook 2019. 2019.
- [85] IEA. Gas 2019. Analysis and forecasts to 2024. June 2019.
- [86] IEA. A long-term view of natural gas security in the European Union. March 2019. Available: <https://www.iea.org/commentaries/a-long-term-view-of-natural-gas-security-in-the-european-union>
- [87] Orkestra. Situación actual del mercado mayorista de gas natural en España. 2018.
- [88] Eurostat. Harmonised Indices of Consumer Prices (HICP). Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/hicp/data/database>.
- [89] European Central Bank. Twenty Years of the ECB's monetary policy. Available: <https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2019/html/ecb.sp190618-ec4cd2443b.en.html>.
- [90] Bank of Spain. Statistical Bulletin. May 2020.
- [91] Public Treasury. Public Debt. Available: <https://www.tesoro.es/deuda-publica/subastas-dev>.
- [92] Official Journal of the European Union. Decision (EU) 2015/1814. 6th October 2015.
- [93] Official Journal of the European Union. Directive (EU) 2018/410. 14th March 2018.
- [94] FEDEA. El papel del gas en la transición. 2019.
- [95] Ministry of Public Works. ERESEE 2017. 2017 Update of the Long-term strategy for energy renovation in the building sector in Spain. 2017.

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Bizitegi-parkeen birgaitze energetikorako ikuspegi  
integrala: Bilboko kasua**

## 3.Artikulua

FERNANDEZ, J.; FLORES, I.; DEL PORTILLO, L.; MARIEL, P.; HOYOS, D. Accounting for homeowners' decisions to insulate: A discrete choice model approach in Spain, Energy & Buildings, 2022, vol. 273, 112417.

**DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112417>

**Aldizkaria:** Energy and Buildings

**ISSN:** 0378-7788

**Kalitateko adierazleak (2021):**

- Eragin faktorea: 7,201
- Journal Citation Indicator-aren (JCI) araberako sailkapena:

| Kategoria                          | JCI Rank | JCI Quartile | JCI Percentile |
|------------------------------------|----------|--------------|----------------|
| Construction & Building Technology | 12/89    | Q1           | 87,08          |
| Energy & Fuels                     | 26/145   | Q1           | 82,41          |
| Engineering, civil                 | 21/175   | Q1           | 88,29          |

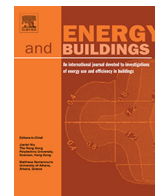
eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Bizitegi-parkeen birgaitze energetikorako ikuspegi  
integrala: Bilboko kasua**



# Accounting for homeowners' decisions to insulate: A discrete choice model approach in Spain



Jon Fernandez-Luzuriaga<sup>a,\*</sup>, Iván Flores-Abascal<sup>a,b</sup>, Luis del Portillo-Valdes<sup>a,b</sup>, Petr Mariel<sup>c</sup>, David Hoyos<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Energy Engineering, University of the Basque Country (UPV/EHU), Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, Bilbao 48013, Spain

<sup>b</sup> ENEDI, Research Group on Energy Efficiency in Buildings, University of the Basque Country (UPV/EHU), Bilbao, Spain

<sup>c</sup> Department of Quantitative Methods, University of the Basque Country (UPV/EHU), Avda. Lehendakari Aguirre, 83, Bilbao 48015, Spain

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 6 July 2022

Revised 16 August 2022

Accepted 17 August 2022

Available online 23 August 2022

### Keywords:

Discrete choice

Mixed logit

Energy efficiency

Policy design

Residential buildings

## ABSTRACT

This paper assesses Spanish households' willingness to thermally insulate their homes and the drivers that influence such a decision-making process. Stated preference data were collected through a discrete choice experiment (DCE). The final sample of 191 respondents and 1,145 observations was analysed by the use of a mixed logit model, weighing the factors that encourage homeowners to carry out façade energy renovations or not. The model enables the quantitative estimation of renovation adoption rates depending on the households' characteristics and public support instruments in place. The results show that homeowners are extremely interested in increasing the thermal insulation of their homes. The actual investment cost required in the existing building stock is lower than the obtained willingness-to-pay. Furthermore, it was found a relevant effect of a variety of household features on renovation choice (income, age, heating system, etc.), which should be contemplated in the energy efficiency policy design. Additionally, a case analysis is performed which comprises 3 household categories. The results reveal that the required subsidy level is different in each case, sometimes even unnecessary, although all of them lower than the grants set by existing aid programs. Thus, to reduce the free-riding effect, a closer perspective would enable targeted support mechanisms towards each household category. Moreover, the policy performance can be improved by combining subsidies with other measures such as low-interest loans or increased tax rebates, which could contribute to improving the cost effectiveness of the public expense associated with direct grants. Overall, an increased tax rebate is preferred to soft financing, although the influence of the latter increases in low-income households.

© 2022 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introduction

The residential sector is responsible for 26.3% of the final energy consumption [1] in the European Union (EU) and causes 23.6% of the greenhouse gas (GHG) emissions [2], which confers it a key role in achieving the ambitious GHG emissions reduction targets for 2050 [3]. In the case of Spain, 17.1% of the final energy demand corresponds to residential buildings [4].

At present, around 35% of the EU's buildings are over 50 years old and almost 75% of the building stock is energy inefficient [5], so the technical potential to reduce GHG emissions by improving thermal insulation and replacing old equipment is huge. The gov-

ernments have sought to exploit this potential through the deployment of numerous regulative instruments, financial incentives and information measures aimed at the residential sector [6,7], but the political success in accelerating household investments in energy efficiency has been limited so far and the energy renovation rate remains scarce: the current annual energy renovation rate is estimated to be close to 1% within the EU [8].

Spain has also provided direct capital grants and low-interest loans for the energy retrofitting of the residential building stock. Several programs have been launched within the framework of the National Energy Efficiency Action Plans (NEEAP) [9,10]. During the period between 2013 and 2016, the PAREER-CRECE Program assigned 180 M€ in aids to promote energy refurbishment and the use of renewable energy in buildings (48% as direct aid and the remaining 52% as repayable loans). As a continuation of the PAREER-CRECE program, the PAREER CRECE II Program was launched in 2017 with an additional budget of 204 M€ and the

Abbreviations: DCE, discrete choice experiment; SP, stated preference; WTP, willingness to pay; MXL, mixed logit model; MNL, multinomial logit model; ASC, alternative-specific constant; Arch., archetype building.

\* Corresponding author.

E-mail address: [jon.fernandezl@ehu.es](mailto:jon.fernandezl@ehu.es) (J. Fernandez-Luzuriaga).

same targets. Complementary to these actions, the 2018–2021 State Housing Plan assigned 132 M€ to promote improvements in energy performance and sustainability in homes [11]. Nevertheless, despite the financial incentives and demonstrated economic viability of energy efficiency measures, a significant investment gap exists in deep energy renovation by homeowners [12].

The reasons behind this energy efficiency gap are widely assessed in the literature [1314]. Of the barriers that prevent households from energy renovations, high up-front costs, lack of financial resources and long payback periods are the most referred factors [1516]. Beyond economic aspects, applied behavioural research considers other elements that influence energy renovation decision-making, such as contextual influences (e.g., sociodemographic characteristics) and personality traits (e.g., attitudes and beliefs) [1718].

Thus, to foster the widespread adoption of energy retrofits in dwellings, it is crucial for policymakers to dive into the perceptions and drivers that affect the homeowners' investment decisions. Estimating the renovation adoption rates based on the expected actions of homeowners, within a wide variety of household circumstances, is essential for an effective energy policy design.

Discrete choice models allow the quantitative assessment of households' preferences regarding energy interventions, by modelling the homeowners' decisions to undertake an energy retrofit as a function of the main determinants influencing it. These tools can be employed to assess the expected level of homeowners' response to institutional support mechanisms aimed at reducing households' energy consumption, and thus generate insights to evaluate ex-ante their potential effectiveness.

The purpose of this paper is to assess Spanish households' willingness to thermally insulate their homes and the drivers that influence such decision-making processes. Furthermore, it analyses the extent to which different financial incentives can leverage the decisions of households, depending on the characteristics of the latter. Stated Preference (SP) data are collected through a Discrete Choice Experiment (DCE) and an econometric model is estimated which weighs the factors that encourage homeowners to carry out façade energy renovations or not. These renovations aim to reduce the space-heating energy demand of the existing dwelling stock, which represents the greatest share of residential energy consumption in Spain [19]. At the same time, the vast majority of inhabitants reside in multi-family buildings, so the DCE comprises only individuals living in the latter.

Spain is an interesting framework of analysis for several reasons. On the one hand, its building stock is very old: 58% of the buildings were built without any energy efficiency criteria and 90% were erected before the implementation of the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) [2021] through the Spanish Technical Building Code (CTE) in 2006 [22]. On the other hand, the lower solvency of Spanish households derived from the pronounced impact of the 2008 economic crisis was still noticeable when the recent COVID-19 crisis hit. Finally, to our knowledge no research has quantified the effect of policy incentives on households' façade thermal insulation through a DCE.

The rest of the paper is structured as follows. Section 2 comprises a literature review in order to contextualize this study. Section 3 describes the methodology employed and presents the data collected. In Section 4 the model results are presented and interpreted. The conclusions are reported in Section 5.

## 2. Literature review

Discrete choice models have been employed for a long time in numerous fields such as marketing, economics or transport

[232425]. Moreover, in recent years, they have been increasingly used for the evaluation of energy efficiency preferences in the residential sector, as indicated below.

A relevant strand of literature has focused on estimating consumers' willingness to pay (WTP) for the benefits arising from energy efficiency improvements. There are studies that assess WTP for green-labelled buildings such as Brounen et al. [26], which estimated a logit model to evaluate the economic implications of Energy Performance Certificates (EPC) in the Dutch residential sector. They documented that homebuyers are willing to pay a premium for homes that have been labelled as more energy efficient, which varies with the label category of the EPC. In Sweden, Zalejska-Jonsson [27] applied a binary logistic model to study the WTP for low-energy and environmentally labelled buildings. The results indicated that people are prepared to pay more for very low-energy buildings, but not as willing to pay for a building with an environmental certificate. This might explain that customers prefer to pay a premium for features they understand and whose potential benefits seem tangible, but may have reservations about environmentally profiled buildings.

Furthermore, many studies have also examined WTP for specific energy saving measures rather than green buildings. Banfi et al. [28] derived a fixed-effects logit model and evaluated consumers' WTP for energy-efficient windows, facades and ventilation systems in Swiss residential buildings. They found that WTP is generally higher than the costs of implementing these measures. Similarly, Kwak et al. [29] estimated multinomial and nested logit models to evaluate the consumer's WTP for thermally improved windows, façades and ventilation systems in Korea's residential buildings. The results showed a significant amount of WTP for those energy saving measures. In China, Zhou et al. [30] examined consumers' WTP for energy-efficient room air conditioners (AC) by means of multinomial and mixed logit models based on collected DCE data. The analysis revealed that the price premium consumers are willing to pay for a variable-speed room AC over a constant-speed AC increases significantly when energy consumption information becomes comparable. A multinomial logit model was also employed by Stolyarova et al. [31] to analyse households' WTP for various space heating systems in France. The findings showed that the more cold-sensitive a household is, the more willing it is to invest in renewable energy sources and to set temperature management.

Likewise, there is abundant literature aimed at analysing the determining factors that lead to the adoption of energy efficiency measures and understanding their diffusion trends. Braun [32] used a multinomial logit model to analyse the determinants of the space heating technology applied by German households and demonstrated the importance of a household's socioeconomic characteristics, building type and region as drivers of the space heating technology applied among seven heating system categories. In Norway, Sopha et al. [33] used empirical data from a survey to develop an agent decision-making model on the adoption and diffusion of three competing heating systems: direct electric heating, individual wood-pellet stove and air-to-air heat pump. The results suggested that the increased adoption of wood-pellet heating was dependent on improved functional reliability and the improvement of fuel stability. Beyond space heating systems, Jridi et al., [34] analysed the determinants for the adoption of solar water heaters, low-energy bulbs and energy efficient refrigerators in Tunisia by using different specifications of discrete choice models. The outcomes showed the strong heterogeneity of households, making the effect of energy policies rather obvious. More recently, Spyridaki et al. [35] explored technology adoption trends for a variety of energy efficiency measures such as efficient air conditioning split units, room thermostats, windows, lighting bulbs, etc., in the

Greek residential sector, demonstrating the necessity to further encourage the financial policies targeting lower-income households.

Nevertheless, these approaches are mostly focused on active energy efficiency systems, and only a few of them address passive measures aimed at building envelope. Therefore, by targeting a passive intervention such as the thermal insulation of the façade, the present study is different from the bulk of the aforementioned literature.

Furthermore, this study does not seek to analyse households' preferences between competing thermal insulation technologies, but to address the prior dichotomy between deciding to invest in this kind of energy efficiency measure or not. The paper targets this primary question and delves into the circumstances that make homeowners decide to retrofit, which differs from asking them what makes one energy saving technology preferable to another. For that purpose, the option of staying with the status quo is always kept along the DCE. In this sense, the approach of the present analysis could be comparable to Achtnicht et Madlener [36].

On the other hand, various studies focused on the examination of free-ridership behaviour, which refers to homeowners that would retrofit even without receiving a subsidy. Nauleau [37] estimated a logit model to assess free-riding on income tax credits for home insulation in France. Alberini et Bigano [38] developed a linear probability model looking for free-riding on an Italian tax credit policy for heating system replacements. Grösche et al. [39] employed a discrete choice model to analyse the effect of grants on households' energy renovation choices and to assess the extent of free-ridership under a German subsidy program. Collins et Curtis [40] used a McFadden's choice model to estimate the extent to which free-riding occurred in an Irish energy efficiency retrofit grant scheme. Dolsak et al. [41] examined the effectiveness of the Slovenian subsidy program on household decisions for energy-efficient building retrofits.

In general, the approach of the latter studies is based on an ex-post evaluation of the outcomes of a preceding energy efficiency support mechanism, by comparing the probability to retrofit before and after its introduction, and usually focus on the individual's characteristics as explanatory variables for his/her greater or lesser inclination towards energy retrofitting. Since they do not comprise policy measures as explanatory variables within discrete choice models, they are not well suited to simulating policy changes that may affect the attractiveness of undertaking an energy efficiency measure. In contrast, the research presented in this paper focuses on evaluating the potential impact of certain governmental financial incentives, together with the influence of the socio-demographic characteristics of the household, on the choice to invest in façade thermal insulation or not.

In Spain, although there are countless studies on the energy efficiency of residential buildings, the application of discrete choice models in this field is limited. Based on data from a survey of Spanish households, Ramos et al. [42] estimated a discrete-choice model and analysed whether pro-environmental households are more likely to invest in energy efficiency and to adopt daily energy-saving habits. Sanchez-Braza et Pablo-Romero [43] evaluated, with a logit model, the effects of a property tax bonus to promote the installation of solar-thermal energy systems in buildings in southern Spain. Finally, Olsthoorn et al. [44] assessed the effects of free-riding on the cost-effectiveness of a rebate program that promoted the adoption of energy-efficient heating systems in eight EU Member States, including Spain. The present study aims to partially fill this gap by shedding light on the Spanish households' willingness to thermally insulate their façades and on the determinants driving such willingness.

### 3. Methodology

#### 3.1. Model specification

The discrete choice experiment performed in this study is based on the random utility theory (RUT) [45], which relies on the premise that the benefit or satisfaction an individual obtains from taking an action can be expressed as some form of utility function. It is based on the hypothesis that every individual is a rational decision-maker who, when faced with a choice, evaluates the characteristics of the different alternatives and then chooses the one which maximizes the utility.

The utility obtained from every alternative is partially formulated as a function of the observable characteristics of the alternatives and the individual making the choice, while the unexplained utility is represented by a stochastic error term. Thus, the utility  $U_{ij}$  that an individual  $i$  obtains from alternative  $j$  can be expressed as Eq. (1).

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} = \beta_j^0 + \beta' X_{ij} + \varepsilon_{ij} \tag{1}$$

where  $V_{ij}$  is the deterministic component of the utility and  $\varepsilon_{ij}$  is the random vector that captures the unobservable factors that influence the utility, but which are not included in  $V_{ij}$ .  $X_{ij}$  is a vector of characteristics (attributes) of either alternative  $j$  and individual  $i$ , and  $\beta$  is the coefficient vector of those attributes.  $\beta_j^0$  is an alternative-specific parameter that expresses the relative preference of one alternative compared to the others.

Thus, when presented with a façade insulation option, we model the utility that an individual perceives from it, based on the attributes that influence such utility. In our estimation, the vector of attributes  $X_{ij}$  comprises both,

- The characteristics of the household, i.e. income, homeowner's age, heating system type, the presence of children, etc., for which it is necessary to collect this information during the DCE.
- The features of the façade renovation alternative, i.e. the required investment cost, the resulting annual energy savings and also the following three determinants that can be set by policy-makers: direct public subsidy, interest rate of available funding and tax rebate. To this effect, renovation alternatives are characterised by these features within the choice sets of the DCE (see section 3.2).

In this way, the derived model allows to analyse the extent to which different financial incentives can leverage the insulation decisions of households, depending on the characteristics of the latter.

The present study applies a mixed logit model (MXL) with random coefficients for the characteristics of alternatives. Random coefficients are assumed to follow a normal distribution except the investment cost coefficient that is assumed to be lognormally distributed with negative sign. To account for observed preference heterogeneity some mean shifters are included in the model represented by interactions of the attributes with sociodemographic variables. The choice probability of individual  $i$  choosing alternative  $j$  out of  $J$  alternatives can be expressed as Eq. (2).

$$P_{ij} = \int \left( \frac{e^{V_{ij}}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{ij}}} \right) \cdot f(\beta) \cdot d\beta \tag{2}$$

where  $f(\beta)$  is a density function. Thus, the MXL probability is a weighted average of the standard logit probabilities evaluated at different values of  $\beta$ , with the weights given by  $f(\beta)$ .

The software R [46] is used to estimate the parameters that describe the density of each random coefficient. Simulation is used to approximate the integral by using 2000 pseudo-Monte Carlo draws for the maximum likelihood (ML) estimation. The multinomial logit model (MNL) was also estimated as a benchmark for our MXL model.

Once the model parameters have been estimated, the willingness to pay distribution for an attribute  $k$  can be simulated by Eq. (3).

$$WTP_k = - \frac{\mu_k + \gamma_k \cdot z + \sigma_k \cdot d_k}{\exp(\mu_c + \gamma_c \cdot z + \sigma_c \cdot d_c)} \quad (3)$$

where  $\mu_k$  and  $\mu_c$  are the estimated mean parameters of the attribute  $k$  and investment cost, respectively,  $\sigma_k$  and  $\sigma_c$  are their corresponding estimated standard deviation parameters,  $\gamma_k$  and  $\gamma_c$  are the estimates of the interaction coefficients associated with the sociodemographic variable  $z$  that is set to a specific value, and  $d_k$  and  $d_c$  are random draws from the  $N(0,1)$  distribution allowing for the simulation of the WTP values. The WTP values are simulated using 10,000 random draws.

### 3.2. Survey design

Data was collected through a DCE in which respondents were presented with several choice sets and asked to choose the alternative they prefer the most. The study consequently relies on Stated Preferences (SP) data. The questionnaire is available for interested readers upon request.

To reflect real-life choice situations, respondents were asked to imagine that their neighbourhood council is divided about whether or not to thermally insulate the façade of the communal building, so the final decision depends on his/her vote. In this context, respondents could either choose between two façade insulation alternatives or to keep the current state (business as usual, no retrofitting). Note that the specific type of thermal insulation (material, thickness, etc.) was not specified in the experiment.

Both renovation alternatives were described by a set of characteristics, or attributes, that are likely to be important for homeowners when choosing to thermally insulate their homes. A focus group discussion was conducted, including a total of 12 homeowners with different socioeconomic levels, aimed at gathering opinions regarding a preliminary set of attributes that had been elaborated by the authors based on an extensive literature review and their experience in this field. During the focus group, together with identifying which attributes should be included in the DCE, according to their relevance rating given by the participants, each attribute's levels were also defined.

The focus group discussion led to the characterization of the renovation alternatives by the following five attributes: investment cost, annual energy savings, direct public subsidy, interest rate of available funding and tax rebate. According to the purpose of the study, the last three are explanatory variables that can be ruled by the government. The selected attributes and their corresponding levels are listed in Table 1.

**Table 1**  
Attributes and attribute levels in the discrete choice experiment.

| Attribute                          | Levels       |
|------------------------------------|--------------|
| Investment cost (in 1,000€)        | 6, 12        |
| Annual energy savings              | 30%, 45%     |
| Direct public subsidy              | 0%, 20%, 35% |
| Interest rate of available funding | 2%, 5%       |
| Tax rebate                         | 18%, 25%     |

Selected attribute levels were found to faithfully reflect the reality. The level ranges of investment cost and annual energy saving were based on several building archetypes evaluated in a previous work [47]. The public subsidy levels were consistent with prior programs deployed in Spain [484950]. In order to set the funding interest rate levels, loan market data was reviewed [51525354]. An existing average interest rate of 5% was verified and, in contrast to that, a reduced rate of 2% was assumed as alternative soft financing. Accordingly, the current legal framework that regulates tax rebates enables a tax deduction of 18% of the investment costs in this kind of façade energy renovations [55]. An increased tax deduction of 25% was additionally defined to test the sensibility of households to this support mechanism.

Constraints related to the complexity of the choice sets limited the number of attributes that were included in the experiment, so as to mitigate the cognitive burden of the respondents. Initially, the environmental perspective had been considered through the introduction of CO2 savings as an attribute, but this was discarded during the focus group, since it was understood to be closely related to annual energy savings. The payback period was also excluded from the design as it can be assumed correlated with the investment cost and the resulting energy savings. In this way, it is also recreated the uncertainty of the economic return that is often handled in real situations.

Combining the attributes and levels specified in Table 1 would lead to 48 possible alternatives. Pairing the alternatives leads to a total of 1128 potential choice sets. In order to select the specific group of choice sets that improves the reliability of the parameters to be estimated by minimizing the elements of their asymptotic covariance matrix, a D-efficient design was generated [56]. Nevertheless, the estimation of the latter required prior information on the model parameters.

Thus, as a preliminary step, a pilot study was set up by creating a survey questionnaire with six choice sets. 8 face-to-face cognitive interviews were carried out with people of different ages, aimed at examining the understandability and level of information of the questionnaire. Based on the feedback received, the clarity of the latter was further improved, and some wording and design aspects refined. The adequacy of the time required to complete the survey was also contrasted, as well as the proposed levels of the attributes in order to verify that they do not lead to any dominant alternative. The pilot study was carried out in two weeks, collecting the answers of 62 respondents. The data was used to estimate the parameters of the model consisting of the specified five attributes and an alternative-specific constant (ASC) for façade insulation alternatives as independent variables.

Those prior parameter estimates were used in R to create the final D-efficient choice experiment which, in order to restrict the task effort for the respondents, was limited to 6 choice sets. A constraint was established on the design so that the two façade insulation alternatives included within each choice set should require the same investment cost and thus reduce the hypothetical character of the choice task. The modified Fedorov exchange algorithm was applied, which swaps alternatives from an initial design matrix with candidate alternatives to minimize the D-error of the determinant of the asymptotic covariance matrix. Nevertheless, it is assumed that adding (extra) socioeconomic variables to the utility function later in the estimation may decrease the efficiency of the derived experimental design.

### 3.3. Sample

The survey was carried out in the Bizkaia province, in northern Spain, which has a population of 1.1 million. Specifically, the



survey focused on the population that dwells in a flat they own within a multifamily residential building, which actually constitute the largest share of inhabitants. Therefore, people living in single-family houses were excluded from the analysis. In addition, the research was interested in individuals who are actually involved in energy renovation-related decisions, so only homeowners were surveyed. Thus, the landlord-tenant problem is left out of the study. At the beginning of the questionnaire, a screening was carried out to ensure that only individuals that satisfied these conditions could proceed with the survey.

The data was collected from the middle of January 2022 to the end of February 2022, by mailing a link to the questionnaire to numerous households in the province. The questionnaire design was divided into four sections: 1) introduction, 2) information about façade thermal insulation, 3) the choice experiment itself and 4) the respondent's socioeconomic data. The introduction explained what the experiment consisted of, its aim and instructions for its correct completion. The second section included information about the benefits of increasing the thermal insulation in the façade such as improved thermal comfort, air quality and noise protection, but no quantitative information about the extent of those benefits was provided. The inconveniences of accomplishing the work in terms of noise, dust and insecurity were also described, as well as the uncertainty related to the expected heating energy savings. In the third section, the respondents answered a group of 6 choice tasks between different hypothetical alternatives. Each choice task consisted of a card showing the features of two façade insulation alternatives, together with the status quo, and required the respondent to choose the preferred option (Table 2). Finally, respondents were asked about their individual characteristics, such as gender, age, income, household size, heating system type, etc.

Overall, 223 questionnaires were answered. However, a total of 32 questionnaires were dropped due to missing socioeconomic data. Therefore, the resulting data set analysed in this paper consists of 191 respondents and the related 1,145 observations.

Table 3 presents the socioeconomic characteristics of the final sample and compares them to the target population data provided by the Basque Institute for Statistics EUSTAT [57]. The statistical analysis confirmed that the sample is fairly representative for households in Bizkaia with respect to gender, age, income, etc.; notwithstanding, it is worth noting that older generations (over 65 years of age) are somewhat underrepresented in the sample, as well as lower income households (<20,000€).

**Table 2**  
An example of a choice set from the DCE (translated and with modified format).

|                                    | Now the hypothetical circumstances have changed. Which option would you choose? |                                 |                                     |
|------------------------------------|---|---------------------------------|-------------------------------------|
|                                    | Façade insulation alt. 1  | Façade insulation alt. 2        | I would not make the investment     |
| Investment cost                    | 12,000€   | 12,000€                         |                                     |
| Annual energy savings              | 45%   | 30%                             |                                     |
| Direct public subsidy              | –   | 20%                             |                                     |
| Interest rate of available funding | 5%  | 2%                              |                                     |
| Tax rebate                         | 25%   | 18%                             |                                     |
|                                    | <input type="checkbox"/> Alt. 1   | <input type="checkbox"/> Alt. 2 | <input type="checkbox"/> Status quo |

**Table 3**  
Summary of sample features and comparison with targeted population.

| Characteristic          | % sample (N = 191) | Population of Bizkaia (EUSTAT) |
|-------------------------|--------------------|--------------------------------|
| Gender                  |                    |                                |
| Male                    | 57%                | 48%                            |
| Female                  | 43%                | 52%                            |
| Age                     |                    |                                |
| 19–35                   | 19%                | 18%                            |
| 36–45                   | 17%                | 16%                            |
| 46–55                   | 18%                | 19%                            |
| 56–65                   | 37%                | 18%                            |
| over 65                 | 9%                 | 29%                            |
| Household's net income  |                    |                                |
| <20,000€                | 5%                 | 22%                            |
| 20,001–35,000€          | 23%                | 24%                            |
| 35,001 – 50,000€        | 28%                | 23%                            |
| 50,001 – 70,000€        | 26%                | 15%                            |
| 70,001€ and more        | 18%                | 16%                            |
| Heating system          |                    |                                |
| Electrical              | 11%                | 23%                            |
| Natural gas             | 75%                | 66%                            |
| Other                   | 14%                | 11%                            |
| Heating set point temp. |                    |                                |
| <= 19°C                 | 21%                | 23%                            |
| 20°C                    | 37%                | 43%                            |
| 21°C                    | 30%                | 22%                            |
| 22°C                    | 9%                 | 10%                            |
| >22°C                   | 3%                 | 3%                             |

## 4. Results and discussion


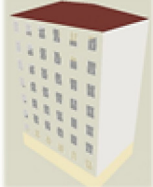
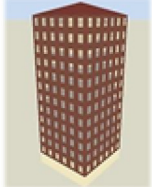
### 4.1. Model estimation results

The survey results indicate that homeowners are highly interested in carrying out the thermal insulation of their homes. Interestingly, in 86% of the choice tasks the respondents chose one of the two façade insulation alternatives, and only 14% of the cases chose the status quo. Even in the choice tasks where the investment cost adopted its high level (12,000€), the status quo option was chosen in no more than 17% of the cases. A likely explanation for such a willingness to energetically retrofit the façade can be given by the context in which the DCE was accomplished. In fact, according to the National Institute of Statistics, Spanish households reached the historical maximum of savings rate during the Covid-19 crisis [58]. The resulting financial capacity, together with the utmost concern for the high energy prices faced by Europe in recent months, may be dominating the decision-making process and encouraging households to increase their energy efficiency. Additionally, it is worth noting that the survey was conducted in the winter period, when households might be more sensitive to heating costs. On top of this macroeconomic context, the fact that lower income households, which according to the results are less likely to rehabilitate, were underrepresented in the survey sample could also have an influence.

The model estimation results are summarised in Table A.1 (see Appendix A), together with the MNL model used as the benchmark. The likelihood ratio test was performed to compare both models. As expected, the result indicates that MXL outperforms MNL (LR = 308.2, df = 5, p-value < 0.001), thus demonstrating the flexibility provided by random parameters to accommodate taste variation. Likewise, the estimated MXL model provides a reasonable fit for the SP data. The obtained pseudo-R<sup>2</sup> of 0.37, which represents an excellent fit [59], is comparable to similar studies [36].

The investment cost parameters shown in Table A.1 are the mean and standard deviation of the natural logarithm of the investment cost coefficient, which follows a log-normal distribu-

**Table 4**  
Summary of the characteristics of the archetype buildings considered in the case analysis.

|                     | Arch. A   | Arch. B   | Arch. C   |
|---------------------|---|---|---|
|                     |  |  |  |
| Urban morphology    | Solid block   | Linear block  | Detached building   |
| Construction period | Before 1960   | 1960–1980   | 1960–1980   |
| Heating system      | Natural gas   | Electrical  | Communal (gasoil)   |
| Investment cost     | 5,000€  | 7,000€  | 10,000€   |
| Energy savings      | 30%   | 37%   | 43%   |
| Household's income  | 82,630€   | 24,406€   | 44,998€   |

**Table 5**  
Predicted probability changes, over the base case, for each attribute modification.

| Modification                           | Energy renovation probability change |
|--|--------------------------------------|
| Larger income (35,000 – 70,000€)       | +15%                                 |
| Homeowner's age between 55 and 65      | +39%                                 |
| Homeowner's age above 65               | +32%                                 |
| Communal heating system                | -10%                                 |
| Natural gas heating system             | +20%                                 |
| Children at home                       | +23%                                 |
| 10% higher investment costs            | -2%                                  |
| 10% higher energy savings              | 2%                                   |
| 10% subsidy level                      | +6%                                  |
| Soft financing (from 5% to 2%)         | +7%                                  |
| Increased tax rebate (from 18% to 25%) | +3%                                  |

tion. The rest of the attributes' parameters used in the experiment (annual energy savings, direct public subsidy, interest rate of available funding and tax rebate) were assumed to vary over individuals with normal distributions. All the obtained parameters have the expected sign and most are significantly different from zero at 1% significance level. Predictably, it was found that larger energy savings show a positive influence on expected utility. The significant standard deviation estimate implies that there is a substantial amount of taste heterogeneity in the data. The support mechanisms that could be determined by the government (i.e., subsidy, funding interest rate and tax rebate) also exert the expected encouraging effect on the façade retrofit option.

These 5 attributes were interacted with the households' income, which was requested in discrete categories. Consequently, a dummy variable was defined in the model to classify households falling below 35,000€ as low-income. A relevant income effect was found on the individuals' responsiveness to these attributes, which differs from other studies in the literature, which concluded that households' income has no measurable impact on their wall insulation activity [60], or even found that residents with the lowest incomes had a relatively higher probability of deciding to apply exterior insulation [61].

The utility of the energy savings decreases for low-income households. This result may be explained by an already low level of energy consumption due to financial reasons: in Spain, there is a strong correlation between the level of income and the inability to maintain an adequate home temperature in winter [62]. Households with a lower current consumption could perceive less potential savings and longer payback periods for investments in energy efficiency. It was also found that low-income households appreciate a smaller utility per unit of public subsidy, meaning that, *ceteris paribus*, a higher subsidy level would be required in order to encourage them to carry out a façade energy renovation. Furthermore, since the financing of the investment in the façade retrofit may require them to further rely on credit, low-income households seem to put more value on an eventual reduced funding interest rate: a relevant additional utility of the latter is perceived by those households. In contrast, high-income homes perceive a greater utility of the tax rebate, i.e., they seem to be more responsive to a reduction in taxation.

On the other hand, the alternative-specific constant (ASC) for façade insulation captures the average effect of the unobserved factors on the retrofitting alternatives, with reference to the status quo. Those factors can include such benefits as increased thermal comfort, health benefits from living in a warmer home, improved asset value of the latter, etc., as well as the uncertainty related to the expected energy savings or the inconveniences of carrying out the works in terms of noise, dust, etc. Initially, a different ASC was allocated to each of the façade renovation alternatives included in the DCE, in order to verify that their order of appearance within the choice tasks had no influence on their choice probability. The latter was proven so a unique ASC was finally included in the utility of the choice alternatives which implied a façade renovation. The ASC is assumed as constant and the obtained positive coefficient indicates that these non-included factors on average increase the façade renovation's likelihood of being chosen: on balance, the benefits seem to clearly outweigh the drawbacks of façade insulation retrofit.

The ASC was interacted with some individual characteristics of the respondents, in order to capture the greater or lesser inclination to choose the façade renovation by different subgroups of

the population. In the survey, data from the respondents was requested on aspects for which previous empirical research or the authors' intuition could anticipate an effect on energy retrofit. The individual characteristics were incorporated into the utility model according to their robust *t*-statistics, so only the features that proved to be statistically significant were finally included.

The respondents' age enters the model significantly. On the one hand, the older generations show a greater willingness to carry out a façade energy renovation. Specifically, people close to retirement age (between 55 and 65) exhibit the highest probability of investing in façade thermal insulation. A plausible explanation for this result could be found in their likely greater financial savings. Furthermore, there is literature that defines the beginning of retirement as an important stage of life when homeowners carry out energy-related home renovations [63], probably aiming to avoid in their retirement the disturbances that a façade renovation often involves and the related impact on safety and comfort. This rationale seems to fit the outcomes. Although to a lesser extent, retired people (above 65) also show a greater inclination to undertake an energy efficient façade renovation, in comparison to younger and middle-aged respondents. A lifestyle which often involves spending a longer time at home can explain this higher willingness to ensure adequate comfort conditions. On the other hand, no significant deviation is found between younger and middle-aged generations. The latter differs from other research which concluded that the younger homeowners were more prone to adopt an investment in energy efficiency [64].

Apart from the individuals' age, information on the household's heating system was also included in the MXL model. In fact, for homes with a heating system defined as "other", rather than natural gas-fired or electrical, the thermal insulation of the façade becomes less attractive. The great majority of these "other" heating systems correspond to centralised – communal – heating systems that usually consume gasoil. Thus, a possible explanation for this result may be found in their energy payment method. Although, in buildings with centralised heating systems, the 2012/27/EU directive [65] demanded the installation of individual metering devices for each dwelling by 2017, its transposition to the Spanish regulatory framework was delayed [66]. As a result, many households still do not currently pay for the energy they actually consume, but on the basis of their participation coefficient in the community [67]. Therefore, if a household understands that its future energy costs will be kept related to the overall thermal behaviour of its neighbours, which is beyond its control, it may be less willing to invest in an energy efficiency measure whose return is more uncertain.

Furthermore, a lower inclination towards façade insulation is observed in households with electrical heating systems than in homes which consume natural gas. In principle, it was predicted that homes with an electrical heating system could have a greater incentive to increase their energy efficiency, as the energy costs are higher in comparison to natural gas heating systems. Nevertheless, the context in which the DCE was conducted coincided with the sharp increase in natural gas prices that households experienced at the beginning of 2022, which has raised public concern to a maximum. This change of paradigm in natural gas prices may explain the observed higher willingness to increase the energy efficiency of natural gas consumers.

In contrast to the study of Dolsak et al. [41], it is verified that the presence of children under 15 in a household has a significant impact on the appreciated utility of a façade retrofit. The initial hypothesis, which may have been proven, was that due to the greater concern about the comfort of the children and the higher energy consumption that living with children often implies, the households with children could demonstrate a higher willingness to undertake energy efficiency measures.

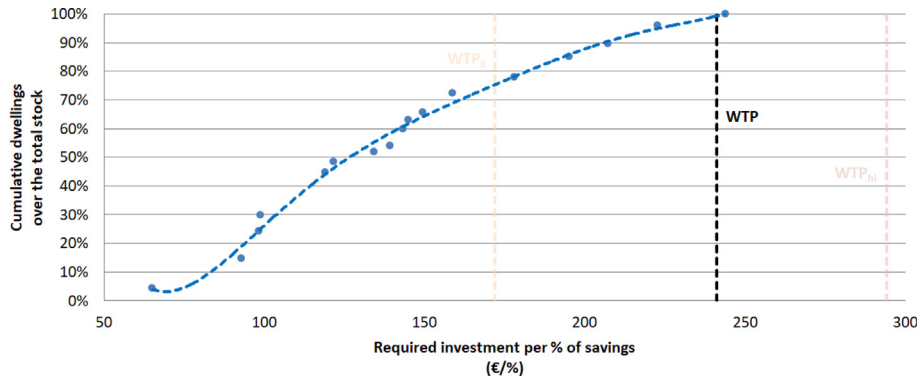
The level of the current heating energy consumption is a factor that can influence the predisposition to improve the energy efficiency of a home as, when the existing consumption is already low, the potential savings from a façade intervention are less. Nevertheless, the survey did not ask directly for households' actual energy consumption because it would have hindered the respondent from answering the questionnaire on the spot, requiring him/her to search for previous energy bills. In a context of an online survey, this could have discouraged respondents from completing the questionnaire. As a proxy for its energy expenditure, the questionnaire asked for the heating set point temperature usually scheduled by the household, but it was demonstrated that it has no relevant influence on the utility.

This constraint, associated with limiting effort of the task for the respondents, also hampered the collection of other relevant data that could influence the probability of investing in an energy efficient façade renovation, such as the age of the building or the amount of financial savings that the households hoard: both may require further consultation by the respondents. On the other hand, the building's current state of conservation was also excluded from the analysis because it is assumed that the answers of the respondents, which may be chosen from a range of qualitative descriptions, would have contained a high degree of subjectivity. In this sense, a more elaborate data collection process would enable further research to incorporate all these factors.

Moreover, aiming to determine the monetary value that households allocate to the heating energy savings achieved through façade insulation, the willingness to pay estimate for these energy savings was derived. Using the means and standard deviations of the coefficients associated with the investment cost and the annual energy savings in Eq. (3), a median WTP was calculated for the following income ranges: below 35,000€ (low-income) and above 35,000€ (middle- and high-income). The results reveal great differences: the WTP of low-income households (172€ per % of savings) is significantly lower than that of middle- and high-income households' WTP (294€). Considering households' income distribution in the targeted population, an overall WTP median of 241€ per % of savings is obtained.

The calculated WTPs for the annual energy savings can be compared with the actual investment costs required to achieve such savings. In Fernandez et al. [68], the residential stock of Bilbao, the capital city of Bizkaia province, was classified in 17 typologies of archetype buildings; while Fernandez et al. [47] assessed the costs of implementing several energy efficiency measures on them, including façade thermal insulation. Having updated these costs to account for the relevant inflation in the construction sector in 2021 [69], the results reveal that the required investment costs in the existing building stock are lower than the overall WTP calculated in the present study. Fig. 1 shows the cumulative distribution of Bilbao's dwellings, based on the representativeness of each archetype, versus the required investment in façade insulation per % of energy savings achieved. It can be verified that almost 100% of the dwellings require a lower investment cost than the WTP obtained in this study. This proportion decreases to approximately 72% for households with income below 35,000€.

The results suggest that, in the case where they have complete information about façade energy renovation and the benefits that these measures entail, the majority of households would be willing to undertake a thermal insulation of their dwellings. Thus, the model indicates that current public support mechanisms should be sufficient to encourage a wide scale adoption of façade insulation retrofits and that an effective means of inducing the latter could be to provide clearer information on the costs and benefits, by quantifying them, to households that may be considering an energy efficiency investment.



**Fig. 1.** Cumulative distribution of Bilbao's dwellings based on the required investment in façade insulation per % of energy savings achieved. It shows overall WTP for energy savings, as well as the WTP for low-income households ( $WTP_{li}$ ) and the WTP for middle- and high-income households ( $WTP_{hi}$ ).

#### 4.2. Case analysis

In this section, the derived MXL model is applied to the residential building stock of Bilbao, in order to simulate households' façade insulation investment decision-making and to provide estimates of the probability of undertaking such an energy renovation. As mentioned, a previous work characterized this residential stock through 17 archetype buildings and, based on an extensive analysis, specified the geometry, urban morphology, constructive solutions, etc., for each one [68]. In this sense, the combination of a discrete choice model, as the one derived in this study, with a comprehensive building stock model enables us to identify specific support mechanisms required by each household category, which could encourage a broader implementation of façade thermal insulations while also improving the cost-effectiveness of the corresponding incentive programs.

To show the applicability of the estimated MXL model and test the policy relevance of the variables included in it, we performed a case analysis made up of 3 archetype buildings (i.e., household categories) named A, B and C (corresponding to archetypes 6, 7 and 14 of Fernandez et al. [68], respectively). Their relevant features are summarised in Table 4. Each archetype building is assigned its predominant heating system, according to the distribution given by the Spanish National Institute of Statistics (INE) [7071], and is associated with the neighbourhood of the city in which it is present to a greater extent. Thereby:

- Arch. A corresponds to the neighbourhood of Abando, located in the city centre and made up of a solid block urban morphology typical of the XIX century "Ensanche" (widening).
- Arch. B is the typical linear block – rationalist style – residential building predominant in the peripheral neighbourhood of Otxarkoaga.
- Arch. C represents a detached, high-rise building that can be found in the residential area of Txurdinaga.

Accordingly, the income level allocated to each home corresponds to the average household income of the associated neighbourhood, provided by the Basque Institute of Statistics EUSTAT [72]. A middle aged family head is assumed in each dwelling.

The case analysis explores the implementation of 8 cm façade thermal insulation, which has been verified as the optimal thickness in this location [47]. In order to estimate the corresponding investment, a cost ratio of 89€/m<sup>2</sup> is assumed, which is based on market prices [73] and includes material costs, labour costs and scaffolding. On top of that, an additional 5% of overhead costs and another 8% of constructor's profit have been considered, while a VAT of 10% and a municipal tax of 2.5% were also included. The

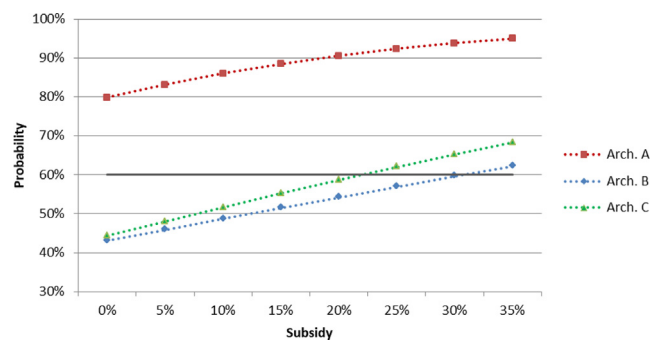
associated energy savings estimations were calculated by the Design Builder v.4.7.0.027 software [74].

Using the obtained discrete choice model, for each archetype, it is first estimated the probability of undertaking façade insulation in a base scenario with no financial incentives in place. Likewise, additional scenarios are produced and simulated with an increasing level of subsidy. Fig. 2 shows the obtained probabilities.

It is verified that the probability of undertaking a façade energy renovation increases approximately in line with the subsidy level. The probability level of 60% is adopted as reference to assume that the exterior thermal insulation of a building would effectively be carried out, as this is the quorum required under article 10.3 of the Spanish Law of Horizontal Property (LPH) for a community of owners of a building to agree on the "modification of the envelope to improve the energy efficiency of the façade" [75].

Arch. A reaches this threshold (it shows a probability of 80%) without the need for any subsidy. The lower investment required, due to the smaller exposed façade of buildings in the compact layout of an "Ensanche" area, seems to prevail. In addition to the better investment cost-energy savings ratio, the obtained MXL model indicates that heating systems of natural gas, which these buildings often have, stimulate façade energy renovations to a greater extent, in comparison with other systems. Both are conditions that can be found in many city centres, as is the case of Bilbao. Hence, in order to minimise the potential free-riding, it would be advisable to take this kind of circumstances into account when defining an incentive policy design. From the point of view of a policymaker, it is also worth noting that it is the household category with the lowest energy saving potential which shows the greatest willingness to undertake façade insulation.

In contrast, a subsidy level of 31% would be necessary in Arch. B for façade insulation to reach the 60% probability of being chosen, while Arch. C would require a subsidy of 22%. Both amounts are



**Fig. 2.** Probability variation according to the subsidy level.

lower than those granted by existing aid programs [4950]. Furthermore, Arch. C shows a similar inclination to retrofit than Arch. B, despite its significantly worse investment to energy saving ratio (€/%), which highlights the need to go beyond a mere cost-savings analysis and to consider other variables, such as income or heating system type, for targeted policy design.

On the other hand, the results show the effectiveness of combining subsidies with low-interest loans or increased tax rebates. These complementary measures can contribute to a reduction in the public expense associated with direct grants while keeping façade insulation investments sufficiently attractive. Fig. 3 shows the lower subsidy required by Arch. B and C to reach 60% of retrofitting probability when complementing it with these measures.

In Arch. C (middle- and high- income households) an increased tax rebate is preferred rather than soft financing, which shows a limited influence. An eventual tax deduction of 25% (compared to the current 18%) would allow the required subsidies to be reduced by approximately half. In contrast, in Arch. B (low-income households) a notably higher sensitivity to low-interest loans is observed, which seem to be preferable in comparison to a higher tax rebate. Combining subsidies with soft financing could allow the required level of the former to be optimised: in the case of Arch. B, the estimated required subsidy is reduced by around 40%.

### 4.3. Marginal effects of explanatory variables

The case analysis has focused on “typical” households that, although representative of a share of the residential building stock, are still hypothetical. Therefore, it is interesting to examine how a different explanatory variable affects the predicted choice probabilities.

Arch. B is taken as the base case and each attribute is successively modified while keeping the rest of the explanatory variables unchanged. In this way, a sensitivity analysis is performed by analysing the isolated effect of every single variable’s change. Table 5 presents the results of this simulation.

Significant energy retrofitting probability increase can be observed for the higher level of income. The obtained probability step suggests that the consideration of household income as a continuous variable or even a further disaggregation of income’s discrete categories could lead to a finer model. Likewise, Table 5 reveals the notable effect of the homeowners’ age on energy renovation decision. Compared to the base case, the older generations show a notably higher probability to retrofit. Having a communal heating system would decrease the perceived utility of a façade energy renovation, while respondents with children at home are substantially more likely to invest in façade insulation.

Interestingly, the sensitivity of the renovation’s likelihood to higher investment costs and energy savings shows a lower order

of magnitude. 10% higher costs would make the façade renovation only 2% less likely, which is similar to the probability rise obtained for 10% larger energy savings. These outcomes show that beyond the economic cost-benefit assessment, a range of household features significantly influence the implementation of energy renovations, and this must be taken into account to capture taste heterogeneity.

Concerning the incentive effect of different policy instruments, it was found that, in Arch. B’s base scenario, the probability increase achieved with a 10% subsidy level would be equivalent to that obtained by providing low-interest loans. Additionally, the results show the latter would be preferred compared to an increased tax rebate.

## 5. Conclusions

Despite the technical potential of reducing heating energy consumption by increasing the insulation of buildings’ envelopes, as well as the financial incentives available to encourage homeowners to do so, residential energy refurbishment is not a common practice today. Meanwhile, long-term decarbonisation targets are compelling us to increase the pace at which the existing housing stock is being renovated. In this context, this paper presents the results of a DCE that enabled us to assess Spanish households’ willingness to thermally insulate their facades and the drivers influencing it. In Spain, the application of discrete choice models is still limited in this specific field and the present study aims to partially fill this gap.

The outcome shows that homeowners are extremely interested in increasing the thermal insulation of their homes: the actual investment cost required to insulate the existing building stock is lower than the overall WTP obtained in the present study. Therefore, households seem to highly value the benefits of improving the thermal insulation of their homes, which were described at the beginning of the conducted questionnaire. This highlights the fact that ensuring appropriate access to information and providing a complete picture of what rehabilitation entails can play a key role in encouraging residential energy refurbishments.

A likely explanation for such a great willingness to energy retrofit the façade can be found in the context in which the survey was conducted: Spanish households reached the historical maximum of savings rate in 2020 due to their lower consumption during the Covid-19 crisis, while the concern about the high energy prices faced by Europe has been at a maximum during the first quarter of 2022. All this means that the existing framework, also considering the European Next Generation EU funds as background, provides an exceptional window of opportunity to accelerate the housing stock’s energy renovation rate.

The estimated MXL model reveals that, beyond monetary costs, a range of household features can, to a great extent, explain the implementation of energy renovations. A relevant income effect was found in the decision to undertake façade insulation: low-income households are less likely to invest in energy retrofit. The homeowners’ age was also found to be a relevant driver. While retired homeowners show a higher disposition to engage in a façade energy renovation in comparison to middle-aged and younger individuals, people just below retirement age exhibit the highest probability of doing it. The household’s heating system also enters the model significantly, with homes that use communal heating systems showing the lowest willingness to increase their energy efficiency. It remains to be further analysed whether this lower inclination persists once their energy payment method is individualised in the near future. In addition, the data confirms that the presence of children under 15 in a household increases the perceived utility of a façade retrofit. All this leads to the conclu-

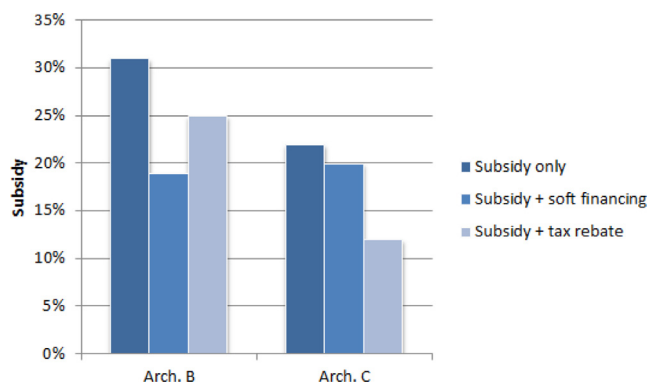


Fig. 3. Subsidy required for a 60% retrofitting probability.

sion that a deeper consideration of these determinants would allow policymakers to identify priority targets that require the mobilisation of resources and to achieve a higher level of buildings renovation.

The MXL model incorporates a set of financial instruments (i.e., subsidies, loans, tax rebates), which permits their potential impact on the adoption of façade energy renovations to be evaluated. In order to demonstrate this functionality, we considered a case analysis made up of 3 household categories. The results reveal that the required subsidy level to ensure that the thermal insulation of a building is actually carried out is different in each case, sometimes even unnecessary, although all of them lower than the grants set by existing aid programs. Thus, instead of a one-size fits all approach, often a common national policy, targeted support mechanisms towards each household category would increase the effectiveness of incentive programs and reduce any potential free-riding. In this sense, the authors believe that an optimal allocation of the public financial resources would require a closer perspective which could be based on local authorities.

Furthermore, the results show that the policy performance can be improved by combining subsidies with other measures, such as low-interest loans or increased tax rebates, which could contribute to improving the cost effectiveness of the public expense associated with direct grants. An increased tax rebate, which middle- and high-income households prefer compared to soft financing, would allow the required subsidy level to be reduced by approximately half. On the other hand, since the financing of the investment may require them to further rely on credit, low-income households value more low-interest funding, which otherwise shows limited influence.

The conducted study has some limitations associated with data collection constraints. As mentioned in section 3.3, both the older generation and lower income households are somewhat underrepresented in the sample, although their associated model parameters show solid statistical significance levels. In addition, according to the results, their influence on the probability to insulate is the opposite, which suggests that their under-representation in the data may not be markedly shifting the overall model. On the other hand, the explanatory variables included in the discrete choice model represent only a limited subset of factors that influence the decision to undertake a façade renovation. Other relevant data, such as the age of the building, its conservation status, the household's financial savings, etc., were excluded from the analysis in order to limit the respondents' task effort in the framework of an online questionnaire. In this sense, this study provides a useful baseline for future research in which a more elaborate data collection process should enable a more detailed investigation into the wide range of household circumstances affecting energy renovation investment decisions.

Furthermore, it is worth noting the usefulness of the derived MXL model for the development of an agent-based modelling. In general, building stock models that are used to explore long-term decarbonisation pathways give limited focus to homeowners' decision-making processes and assume exogenously defined rates of building retrofits. As these approaches pre-establish how many and which of the dwellings will be renovated each time, they cannot indicate the impact of the different sets of public policies (i.e., subsidies, favourable loans, taxation, etc.) that will actually influence the adoption rate of energy efficiency measures. Nevertheless, in combination with discrete choice models, renovation scenarios could be constructed which simulate the effectiveness of alternative incentive instruments [76]. This would constitute a key tool to assist policymakers in the comparison of alternative policies and the identification of the most efficient ones, so as to boost the energy efficiency of the residential sector.

### Data availability

The data that has been used is confidential.

### Declaration of Competing Interest

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

### Appendix A

Table A.1.

Table A1  
Results of the estimated models.

| Attributes                     | MNL        | MXL        |           |
|--------------------------------|------------|------------|-----------|
|                                |            | Mean       | Std. dev. |
| Investment cost (in 1.000€)    | -0.321 *** | -1.128 *** | 0.609 *** |
| Income below 35,000€           | 0.109      | -0.132     |           |
| Energy saving (in %/year)      | 0.080 ***  | 0.108 ***  | 0.086 *** |
| Income below 35,000€           | -0.036 **  | -0.048 *   |           |
| Subsidy (in %)                 | 0.061 ***  | 0.084 ***  | 0.023 *** |
| Income below 35,000€           | -0.025 *** | -0.029 **  |           |
| Soft financing (dummy)         | 0.136 *    | 0.224 **   | 0.017     |
| Income below 35,000€           | 0.414 **   | 0.441 **   |           |
| Increased tax rebate (dummy)   | 0.677 ***  | 0.863 ***  | 0.065     |
| Income below 35,000€           | -0.544 *** | -0.569 **  |           |
| ASC (insulation vs status quo) | -0.392     | 1.502 *    |           |
| Age between 55 and 65          | 2.760 ***  | 4.293 ***  |           |
| Age above 65                   | 1.990 ***  | 3.305 **   |           |
| Children at home               | 1.280 **   | 2.255 *    |           |
| Electrical heating system      | -1.087 *   | -2.034 *   |           |
| "Other" heating system         | -1.678 *** | -3.047 *** |           |
| Respondents                    | 191        | 191        |           |
| Observed choices               | 1145       | 1145       |           |
| Log-likelihood                 | -948.9     | -794.83    |           |
| Pseudo R <sup>2</sup>          | 0.25       | 0.37       |           |
| AIC                            | 1929.85    | 1631.59    |           |
| BIC                            | 2010.55    | 1737.49    |           |

\* Statistical significance at p < 0.1 level.  
 \*\* Statistical significance at p < 0.05 level.  
 \*\*\* Statistical significance at p < 0.01 level.

### References

- [1] EUROSTAT. *Statistics Explained. Energy consumption in households*. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained> [Accessed 30.03.2022].
- [2] EUROSTAT. *Statistics Explained. Greenhouse gas emission statistics – carbon footprints*. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained> [Accessed 30.03.2022].
- [3] European Commission. *2050 long-term strategy*. Available: [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en) [Accessed 31.03.2022].
- [4] La Energía en España. (2018).
- [5] . [Accessed 31 (2022) 03. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en).
- [6] Bertoldi, p., Overview of the European Union policies to promote more sustainable behaviours in energy end-users, in: M. Lopes, C. Henggeler Antunes, K.B. Janda (Eds.), *Energy and Behaviour Towards a Low Carbon Future*, Academic Press, 2019, pp. 451–477.
- [7] M. Economidou, V. Todeschi, P. Bertoldi, D. D'Agostino, P. Zangheri, L. Castellazzi, Review of 50 years of EU energy efficiency policies for buildings, *Energy & Buildings* 225 (2020) 110322.
- [8] European Commission. *Comprehensive study of building energy renovation activities and the uptake of nearly zero-energy buildings in the EU*. Final report. November 2019.
- [9] Ministry of Industry, Energy and Tourism. *2014 – 2020 National Energy Efficiency Action Plan*. 30<sup>th</sup> April 2014.
- [10] Ministry of Energy, Tourism and Digital Agenda. *2017 – 2020 National Energy Efficiency Action Plan*. 23<sup>th</sup> May 2017.

- [11] Ministry of Public Works. *2020 Update of the long-term strategy for energy renovation in the building sector in Spain (ERESEE)*. 2020.
- [12] I. Kastner, P. Stern, Examining the decision-making processes behind household energy investments: A review, *Energy Research & Social Science* 10 (2015) 72–89.
- [13] T.D. Gerarden, R.G. Newell, R.N. Stavins, Assessing the Energy-Efficiency Gap, *Journal of Economic Literature* 55 (2017) 1486–1525.
- [14] M.M. Solá, A. de Ayala, I. Galarraga, M. Escapa, Promoting energy efficiency at household level: a literature review, *Energy Efficiency* 14 (2021) 6.
- [15] C. Wilson, L. Crane, G. Chrysoschoidis, Why do homeowners renovate energy efficiently?, *Contrasting perspectives and implications for policy*, *Energy Research & Social Science* 7 (2015) 12–22.
- [16] R. Jagarajan, M.N.A.M. Asmoni, A.H. Mohammed, M.N. Jaafar, J.L.Y. Mei, M. Baba, Green retrofitting – A review of current status, implementations and challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017) 1360–1368.
- [17] N. Hrovatin, J. Zoric, Determinants of energy-efficient home retrofits in Slovenia: The role of information sources, *Energy & Buildings* 180 (2018) 42–50.
- [18] E. Laes, I. Mayeres, N. Renders, P. Valkering, S. Verbeke, How do policies help to increase the uptake of carbon reduction measures in the EU residential sector?, *Evidence from recent studies*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94 (2018) 234–250.
- [19] IDAE. *Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España*. 2011.
- [20] Official Journal of the European Union. Directive 2002/91/EC. 2002.
- [21] Ministry of Public Works. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE. Ahorro de energía.
- [22] Idae, *Las claves para conocer y actuar en materia de, Certificación Energética de los Edificios*. (2015).
- [23] K. Train, *Discrete Choice Methods with Simulation*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2009.
- [24] D. Hoyos, The state of the art of environmental valuation with discrete choice experiments, *Ecological Economics* 69 (2010) 1595–1603.
- [25] Mariel, Petr & Hoyos, David & Meyerhoff, Jürgen & Czajkowski, Mikołaj & Dekker, Thijs & Glenk, Klaus & Jacobsen, Jette & Liebe, Ulf & Olsen, Søren & Sagebiel, Julian & Thiene, Mara. *Environmental Valuation with Discrete Choice Experiments. Guidance on Design, Implementation and Data Analysis*. 2020.
- [26] D. Brounen, N. Kok, On the economics of energy labels in the housing market, *Journal of Environmental Economics and Management* 62 (2011) 166–179.
- [27] A. Zalejska-jonsson, Stated WTP and rational WTP: Willingness to pay for green apartments in Sweden, *Sustainable Cities and Society* 13 (2014) 46–56.
- [28] Banfi, s., farsfi, m.; filippini, m., jakob, m., Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings, *Energy Economics* 30 (2008) 503–516.
- [29] S.Y. Kwak, S.H. Yoo, S.J. Kwak, Valuing energy-saving measures in residential buildings: A choice experiment study, *Energy Policy* 38 (2010) 673–677.
- [30] H. Zhou, J.O. Bukenya, Information inefficiency and willingness-to-pay for energy-efficient technology: A stated preference approach for China Energy Label, *Energy Policy* 91 (2016) 12–21.
- [31] STORYAROVA, E.; LE CADRE, H.; OSSO, D.; ALLIBE, B. *Stated Preferences for Space Heating Investment*, 2015, Economic Modelling Conference, Boston, United States.
- [32] Braun, f.g., Determinants of households' space heating type: A discrete choice analysis for German households, *Energy Policy* 38 (2010) 5493–5503.
- [33] B.M. Sopha, C.A. Klockner, E.G. Hertwich, Adoption and diffusion of heating systems in Norway: Coupling agent-based modeling with empirical research, *Environmental Innovation and Societal Transitions* 8 (2013) 42–61.
- [34] O. Jidri, S.A. Bargaoui, F.Z. Nouri, Household preferences for energy saving measures: Approach of discrete choice models, *Energy and Buildings* 103 (2015) 38–47.
- [35] N.A. Spyridaki, V. Stavrakas, Y. Dendramis, A. Flamos, Understanding technology ownership to reveal adoption trends for energy efficiency measures in the Greek residential sector, *Energy Policy* 140 (2020) 111413.
- [36] M. Achtnicht, R. Madlener, Factors influencing German house owners' preferences on energy retrofits, *Energy Policy* 68 (2014) 254–263.
- [37] Nauleau, m.l., Free-riding on tax credits for home insulation in France: An econometric assessment using panel data, *Energy Economics* 46 (2014) 78–92.
- [38] A. Alberini, A. Bigano, How effective are energy-efficiency incentive programs?, *Evidence from Italian homeowners*, *Energy Economics* 52 (2015) 576–585.
- [39] GRÖSCHE, P.; VANCE, C. *Willingness-to-Pay for Energy Conservation and Free-Ridership on Subsidization – Evidence from Germany*, 2018, Ruhr Economic Paper No. 58.
- [40] M. Collins, J. Curtis, Willingness-to-pay and free-riding in a national energy efficiency retrofit grant scheme, *Energy Policy* 118 (2018) 211–220.
- [41] J. Dolsak, N. Hrovatin, ZORIC, J. *Factors impacting energy-efficient retrofits in the residential sector: The effectiveness of the Slovenian subsidy program*, *Energy & Buildings* 229 (2020) 110501.
- [42] A. Ramos, X. Labandeira, A. Loschel, Pro-environmental Households and Energy Efficiency in Spain, *Environmental and Resource Economics* 63 (2016) 367–393.
- [43] A. Sanchez-Braza, M. Pablo-Romero, Evaluation of property tax bonus to promote solar thermal systems in Andalusia (Spain), *Energy Policy* 67 (2014) 832–843.
- [44] M. Olsthoorn, J. Schleich, X. Gassmann, C. Faure, Free riding and rebates for residential energy efficiency upgrades: A multi-country contingent valuation experiment, *Energy Economics* 68 (2017) 33–44.
- [45] DOMENCICH, T.; MCFADDEN, D.L. *Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis*. North-Holland Publishing Co., 1975. Available: <https://eml.berkeley.edu/~mcfadden/travel.html>.
- [46] R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org>.
- [47] J. Fernandez, I. Flores, L. del Portillo, Identification of cost-optimal levels for energy refurbishment of a residential building stock under different scenarios: Application at the urban scale, *Energy & Buildings* 240 (2021) 110880.
- [48] IDAE. *Programa PAREER-CRECE*. Available: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-rehabilitacion-de-edificios-programa-pareer/programa-de-ayudas-para-la> [Accessed 13.09.2021].
- [49] EVE. *Programa de ayudas para actuaciones de rehabilitación energética en edificios existentes en Euskadi. Programa PREE. Bases*. 2020.
- [50] BOPV. *ORDEN de 21 de julio de 2021, del Consejero de Planificación Territorial, Vivienda y Transportes, sobre medidas financieras para actuaciones protegibles en materia de rehabilitación en viviendas y edificios, accesibilidad y eficiencia energética*. 9<sup>th</sup> September 2021.
- [51] Kutxabank. *Préstamo verde*. Available: <https://portal.kutxabank.es/cs/Satellite/kb/es/particulares/productos/prestamos-consumo/prestamo-coche-verde/pvs> [Accessed 20.09.2021].
- [52] BBVA. *Préstamo Eficiencia Energética*. Available: <https://www.bbva.es/finanzas-visitazo/ef/prestamos/asi-es-el-nuevo-prestamo-eficiencia-energetica-bbva.html> [Accessed 21.09.2021].
- [53] CincoDías. *Santander se lanza a por los créditos verdes para la rehabilitación de viviendas*. Available: [https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/08/07/companias/1628335523\\_801440.html](https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/08/07/companias/1628335523_801440.html) [Accessed 21.09.2021].
- [54] ICO. *Empresas y Emprendedores*. Available: <https://www.ico.es/web/guest/ico-empresas-y-emprendedores> [Accessed 23.09.2021].
- [55] BOB. *Norma Foral 13/2013 de 5 de diciembre, del Impuesto sobre la Renta de las Personas Físicas*. 13<sup>th</sup> December 2013.
- [56] ChoiceMetrics. *Ngene 1.2. User Manual & Reference Guide*. 31<sup>st</sup> January 2018.
- [57] Eustat, Euskal Estatistika Erakundea – Instituto Vasco de Estadística, <https://eu.eustat.eus>.
- [58] I.N.E. *Cuentas, Trimestrales no Financieras de los Sectores Institucionales. Cuarto trimestre de 2020, 31st March*, 2021.
- [59] MCFADDEN, D.L. Quantitative Methods for Analyzing Travel Behaviour of Individuals: Some Recent Developments. In David A. Hensher and Peter R. Stopher (Ed), *Behavioural Travel Modelling*, Routledge, 1979.
- [60] Frieghe, j., Increasing homeowners' insulation activity in Germany: An empirically grounded agent-based model analysis, *Energy and Buildings* 128 (2016) 756–771.
- [61] O. Kaya, A.M. Klepacka, W.J. Florkowski, The role of personal and environmental factors in rural homeowners decision to insulate: an example from Poland, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150 (2021) 111474.
- [62] . *Estrategia Nacional contra la Pobreza Energética (2019–2024)*.
- [63] M.I. Abreu, R.A.F. de Oliveira, J. Lopes, Younger vs. older homeowners in building energy-related renovations: Learning from the Portuguese case, *Energy Reports* 6 (2020) 159–164.
- [64] G. Nair, L. Gustavsson, K. Mahapatra, Factors influencing energy efficiency investments in existing Swedish residential buildings, *Energy Policy* 38 (2010) 2956–2963.
- [65] . *Official Journal of the European Union. Directive (2012/27/EU)*. 2012.
- [66] BOE. *Real Decreto 736/2020, de 4 de agosto, por el que se regula la contabilización de consumos individuales en instalaciones térmicas de edificios*. 6<sup>th</sup> August 2020.
- [67] El Correo. *57.500 hogares vizcaínos con calefacción central deben instalar contadores individuales*. 24<sup>th</sup> December 2021.
- [68] J. Fernandez, L. del Portillo, I. Flores, A novel residential heating consumption characterization approach at city level from available public data: Description and case study, *Energy and Buildings* 221 (2020) 110082.
- [69] Ministry of Transport, Mobility and Urban Agenda. *Índice de costes del sector de la construcción. CNAE 2009. Base 2015*. Available: <https://www.fomento.gob.es/be/2nivel=2&orden=08000000>.
- [70] INE (Spanish National Institute of Statistics). *Population and Housing Census (2001)*. Available: <http://www.ine.es/censo/es/inicio.jsp>.
- [71] INE (Spanish National Institute of Statistics). *Population and Housing Census (2011)*. Available: <https://www.ine.es/censos2011/tablas/Inicio.do>.
- [72] EUSTAT. *Personal and family income (2019)*. Available: [https://www.eustat.eus/estadisticas/tema\\_395/opt\\_0/tipo\\_1/ti\\_renta-personal-y-familiar/temas.html](https://www.eustat.eus/estadisticas/tema_395/opt_0/tipo_1/ti_renta-personal-y-familiar/temas.html).
- [73] CYPE Ingenieros. *Database of Construction Products and Systems*. Available: <http://www.generadordeprecios.info>.
- [74] DesignBuilder simulation tool. DesignBuilder Software Ltd, UK. Available online: <https://designbuilder.co.uk>.
- [75] BOE. *Ley 49/1960, de 21 de julio, sobre propiedad horizontal*. 23<sup>th</sup> July 1960.
- [76] C. Nägeli, M. Jakob, G. Catenazzi, Y. Ostermeyer, Towards agent-based building stock modelling: Bottom-up modelling of long-term stock dynamics affecting the energy and climate impact of building stocks, *Energy & Buildings* 211 (2020) 109763.

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Bizitegi-parkeen birgaitze energetikorako ikuspegi  
integrala: Bilboko kasua**



## II. Bilbo hiriaren bizitegi-parkearen karakterizazioa

Deskribatutako metodologiaren lehenengo fasea Bilbo hiriaren etxebizitza-sektoreari aplikatu zaio. Kapitulu honek aplikazio-prozesu horretan sakontzen du, argitaratutako 1. artikuluan deskribatzen dena xehetasun-maila handiagoarekin osatuz.

Helburua proposatutako metodologiaren aplikagarritasuna frogatzea izan da eta, aldi berean, Bilboko etxebizitza-sektorearen kontsumo termikoa karakterizatzea, birgaitze energetikoarekin lotutako hurrengo analisisen (bigarren eta hirugarren faseen) oinarria dena.

### II.1. Bizitegi-parkearen analisi eta segmentazioa

#### II.1.1. Bizitegi-parkearen egitura

Lehenik eta behin, segmentatutako bizitegi-parkea ebaluatu eta mugatu da.

##### II.1.1.1. 1. Etxebizitza nagusiak, bigarren etxebizitzak eta etxebizitza hutsak

Ematen zaien erabilera motaren arabera, bizilekuak etxebizitza nagusitan, bigarren etxebizitzetan eta etxebizitza hutsetan sailka daitezke. Etxe bat urte osoan zehar erabiltzen denean, ohiko bizileku gisa, etxebizitza nagusitzat hartzen da. Bigarren etxebizitzak urtean zehar aldizka edo noizean behin baino ez direnak erabiltzen dira. Etxebizitza hutsak bizilagunik gabekoak dira.

Aipatutako sailkapenaren arabera, Bilboko bizitegi-parkea honela banatzen da [50].

**II.1. Taula: Bilboko bizitegi-parkearen banaketa etxebizitza nagusietan, bigarren etxebizitzetan eta etxebizitza hutsetan.**

| <b>Etxebizitza mota</b> | <b>Etxebizitza kopurua</b> | <b>Zatia</b> |
|-------------------------|----------------------------|--------------|
| Etxebizitza nagusiak    | 147.655                    | %90,8        |
| Bigarren etxebizitzak   | 3.530                      | %2,2         |
| Etxebizitza hutsak      | 11.375                     | %7,0         |
| <b>Totala</b>           | <b>162.560</b>             |              |

Bilbon, etxebizitza hutsen zatia (%7) Euskadiko batez bestekoa (%8,4) baino txikiagoa da. Bigarren mailako etxebizitzaren zatia mespretxagarria da, Bilbo hiria ez baita aldizkako oporren ohiko tokia.

Burututako analisia etxebizitza nagusien ebaluaziora bideratuta dago eta, beraz, aztertutako parkea 147.655 etxebizitzek osatutakoa da.

##### II.1.1.1. 2. Bizitegi-parkearen antzintasuna

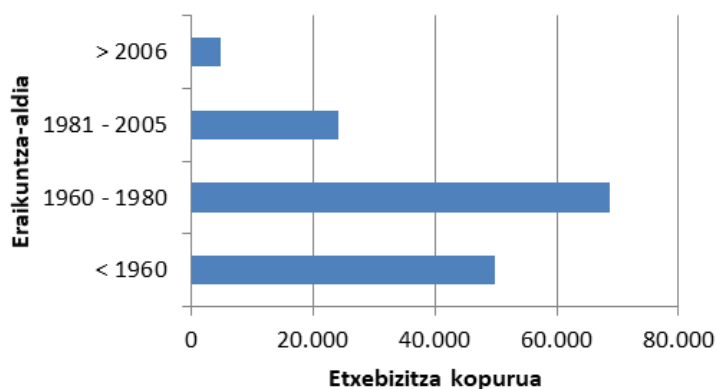
Bilboko etxebizitza nagusiak eraikuntza-aldiaren arabera sailkatzen badira, II.2. Taula lortzen da.

## II.2.Taula: Bilboko etxebizitza nagusien banaketa eraikuntza-aldiaren arabera.

| Eraikuntza aldia | Etxebizitza kopurua | Zatia |
|------------------|---------------------|-------|
| < 1960           | 49.810              | %33,7 |
| 1960 - 1980      | 68.645              | %46,5 |
| 1981 - 2005      | 24.165              | %16,4 |
| > 2006           | 4.780               | %3,2  |

\* Lehen aipatutako 147.655 etxebizitza nagusien kopurua lortzeko, estatistikan eraikitze-aldiari buruzko daturik gabe agertzen diren beste 265 etxebizitza gehitu beharko lirakeke taularatutakoei.

Ikus daitekeen moduan, bizitegi-parkearen ia erdia 20 urteko epean eraiki zen, 1960 eta 1980. urteen arteko Desarrollismo garaian. Eraikuntza-aldi bereizgarri hori guztia, beraz, batera hartu da segmentazio-parametroen muga-balio eta tartekak zehazterakoan.



## II.1. Irudia: Bilboko etxebizitza nagusien banaketa eraikuntza-aldiaren arabera.

Bestalde, etxebizitzaren %80a isolamendu termikoen erabilera lehen aldiz sustatu zuen NBE-CT-79 araua indarrean sartu baino lehen eraiki ziren. Bestalde, 2006tik indarrean dagoen CTE araua betetzen duten etxeen kopurua oso txikia da.

### II.1.1. 3. Familia bakarreko etxeak eta apartamentu-blokeak

Bizitegi-parkeak karakterizatzean, ohikoa da eraikinak familia bakarreko etxeetan eta apartamentu-bloketan bereiztea.

2011ko INEren erroldan ez dago eraikinen kategorizazio horri buruzko daturik. Hauek topatzeko, 2001eko (aurreko) erroldara jo beharra dago [111]. Hala ere, 2001eko emaitzak adierazgarritzat hartzen dira, etxebizitza nagusien %90 baino gehiago jadanik eraikita baitzegoen urte horretan.

II.3. Taulan ikus daitekeen moduan, familia bakarreko eraikinak %1 baino gutxiago ziren Bilbon, bizileku gehienak apartamentu-blokeak izanik. Beraz, etxebizitzaren sailkapenerako segmentazio-irizpide hau erabiltzea baztertu egiten da.

### II.3.Taula: Bilboko bizitegi-eraikinen banaketa.

|   |   |       |
|---|---|-------|
| 1 | Familia bakarreko eraikinak                     | %0,8  |
| 2 | Bizilekuak diren apartamentu-blokeak            | %16,4 |
| 3 | Nagusiki bizilekuak diren apartamentu-blokeak   | %81,2 |
| 4 | Nagusiki komertzialak diren apartamentu-blokeak | %0,5  |
| 5 | Etxebizitza kolektiboen eraikinak               | %1,1  |

#### II.1.2. Bizitegi-parkearen segmentazioa

Bilboko bizitegi-parkea sailkatzeko aplikatutako segmentazio-irizpideen muga-balioak eta tarteak II.4. Taulan adierazten dira. Eraikuntza-aldiarenak aipatu dira jada, eta Desarrollismo periodoarekin eta arau tekniko ezberdinen aldiarekin lotuta daude. Solairu kopuruarentzako muga-balioak IDAEek erabilitakoen antzera definitzen dira [54]. Bestalde, azalera erabilgarriaren tarteak zehazterako orduan oreka bat bilatu da segmentazio-sentikortasunaren (zeharka etxebizitza-talde bat zein auzoetan koka daitekeen bereizteko gaitasuna emango duena) eta segmentazio-irizpideak konbinatzean lortzen den etxebizitza-talde kopuruaren artean.

#### II.4. Taula: Bilboko bizitegi-parkea sailkatzeko aplikatutako segmentazio-irizpideen muga-balioak eta tarteak.

| Eraikuntza aldia | Eraikinaren solairu kopurua | Etxebizitzaren azalera erabilgarria |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| < 1960           | 1 - 3                       | < 60 m <sup>2</sup>                 |
| 1960 - 1980      | 4 - 6                       | 60 - 90 m <sup>2</sup>              |
| 1981 - 2005      | 7 - 9                       | 90 - 120 m <sup>2</sup>             |
| > 2006           | > 10                        | > 120 m <sup>2</sup>                |

Segmentazio-irizpide horiek konbinatuz II.5. Taularen sailkapena lortzen da, etxebizitza-talde bakoitzarekin lotutako etxe kopurua adierazten duena. Taularen etxebizitza kopuru totala (137.025) lehenago aipatutako 147.655 etxebizitza nagusiak baino zertxobait txikiagoa da. Izan ere, II.5. Taula eraikitze erabilitako datu estatistiko desagregatuetan, INEk ez du 5 lagin-unitate baino gutxiago dituzten etxebizitza-moten kopuru erreala adierazten eta balio nuluak ematen ditu.

#### II.5. Taula: segmentazio-irizpideak konbinatuz lortzen diren etxebizitza-moten banaketa.

| Eraikuntza-aldia | Eraikinaren solairu kopurua | Etxebizitzaren azalera erabilgarria |                        |                         |                      | Etxebizitza kopurua | (%)    |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|--------|
|                  |                             | < 60 m <sup>2</sup>                 | 60 - 90 m <sup>2</sup> | 90 - 120 m <sup>2</sup> | > 120 m <sup>2</sup> |                     |        |
| < 1960           | < 3                         | 645                                 | 120                    | 65                      | 80                   | <b>910</b>          | %0,66  |
|                  | 4 - 6                       | 8.020                               | 8.725                  | 1.815                   | 310                  | <b>18.870</b>       | %13,77 |
|                  | 7 - 9                       | 5.100                               | 11.480                 | 4.690                   | 3.295                | <b>24.565</b>       | %17,93 |
|                  | > 10                        | 305                                 | 930                    | 385                     | 85                   | <b>1.705</b>        | %1,24  |
| 1960 - 1980      | < 3                         | 140                                 | 0                      | 0                       | 0                    | <b>140</b>          | %0,10  |
|                  | 4 - 6                       | 6.570                               | 7.615                  | 1.265                   | 0                    | <b>15.450</b>       | %11,28 |
|                  | 7 - 9                       | 6.985                               | 17.715                 | 3.865                   | 1.140                | <b>29.705</b>       | %21,68 |

|             |                            |               |               |               |              |                |        |
|-------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|----------------|--------|
|             | > 10                       | 3.970         | 12.515        | 4.915         | 1.115        | <b>22.515</b>  | %16,43 |
| 1981 - 2005 | < 3                        | 0             | 85            | 0             | 0            | <b>85</b>      | %0,06  |
|             | 4 - 6                      | 885           | 5.470         | 645           | 0            | <b>7.000</b>   | %5,11  |
|             | 7 - 9                      | 1.505         | 6.760         | 2.085         | 145          | <b>10.495</b>  | %7,66  |
|             | > 10                       | 0             | 2.755         | 725           | 0            | <b>3.480</b>   | %2,54  |
| > 2006      | < 3                        | 0             | 0             | 0             | 0            | <b>0</b>       | %0,00  |
|             | 4 - 6                      | 175           | 1.090         | 0             | 0            | <b>1.265</b>   | %0,92  |
|             | 7 - 9                      | 175           | 490           | 110           | 0            | <b>775</b>     | %0,57  |
|             | > 10                       | 0             | 65            | 0             | 0            | <b>65</b>      | %0,05  |
|             | <b>Etxebizitza kopurua</b> | <b>34.475</b> | <b>75.815</b> | <b>20.565</b> | <b>6.170</b> | <b>137.025</b> |        |
|             | (%)                        | %25,16        | %55,33        | %15,01        | %4,50        |                |        |

II.5. Taulak etxebizitza-talde adierazgarrienak identifikatzea ahalbidetzen du. Talde bakoitzak bizitegi-parke osoarekiko duen pisuari erreparatuz, II.6. Taula lortzen da.

II.6. Taula: sailkatutako etxebizitza-moten pisua bizitegi-parke osoan.

| Eraikuntza-aldia | Eraikinaren solairu kopurua | Etxebizitzaren azalera erabilgarria |                        |                         |                      |
|------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
|                  |                             | < 60 m <sup>2</sup>                 | 60 - 90 m <sup>2</sup> | 90 - 120 m <sup>2</sup> | > 120 m <sup>2</sup> |
| < 1960           | < 3                         | %0,47                               | %0,09                  | %0,05                   | %0,06                |
|                  | 4 - 6                       | %5,85                               | %6,37                  | %1,32                   | %0,23                |
|                  | 7 - 9                       | %3,72                               | %8,38                  | %3,42                   | %2,40                |
|                  | > 10                        | %0,22                               | %0,68                  | %0,28                   | %0,06                |
| 1960 - 1980      | < 3                         | %0,10                               | %0,00                  | %0,00                   | %0,00                |
|                  | 4 - 6                       | %4,79                               | %5,56                  | %0,92                   | %0,00                |
|                  | 7 - 9                       | %5,10                               | %12,93                 | %2,82                   | %0,83                |
|                  | > 10                        | %2,90                               | %9,13                  | %3,59                   | %0,81                |
| 1981 - 2005      | < 3                         | %0,00                               | %0,06                  | %0,00                   | %0,00                |
|                  | 4 - 6                       | %0,65                               | %3,99                  | %0,47                   | %0,00                |
|                  | 7 - 9                       | %1,10                               | %4,93                  | %1,52                   | %0,11                |
|                  | > 10                        | %0,00                               | %2,01                  | %0,53                   | %0,00                |
| > 2006           | < 3                         | %0,00                               | %0,00                  | %0,00                   | %0,00                |
|                  | 4 - 6                       | %0,13                               | %0,80                  | %0,00                   | %0,00                |
|                  | 7 - 9                       | %0,13                               | %0,36                  | %0,08                   | %0,00                |
|                  | > 10                        | %0,00                               | %0,05                  | %0,00                   | %0,00                |

%2tik gorako pisua duten etxebizitza motak hartuz, 17 etxebizitza adierazgarri lortu dira. Oro har, Bilboko bizitegi-parke osoaren %88 osatzen dute. II.7. Taulak "EA 1"-tik "EA 17"-ra izendatu diren etxebizitza adierazgarri horien ezaugarriak laburtzen ditu.



II.7. Taula: aukeratutako 17 etxebizitza adierazgarrien ezaugarriak.

| Eraikitze-aldia | Eraikinaren solairu kopurua | Azalera erabilgarria   | Etxebizitza adierazgarria | Etxebizitza kopurua | Zatia         |
|-----------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|---------------|
| 1960            | 4 - 6 solairu               | < 60 m <sup>2</sup>    | EA 1                      | 8.020               | %5,85         |
|                 |                             | 60 - 90 m <sup>2</sup> | EA 2                      | 8.725               | %6,37         |
|                 | 7 - 9 solairu               | < 60 m <sup>2</sup>    | EA 3                      | 5.100               | %3,72         |
|                 |                             | 60 - 90 m <sup>2</sup> | EA 4                      | 11.480              | %8,38         |
|                 |                             | 90- 120 m <sup>2</sup> | EA 5                      | 4.690               | %3,42         |
|                 |                             | > 120 m <sup>2</sup>   | EA 6                      | 3.295               | %2,40         |
| 1960 - 1980     | 4 - 6 solairu               | < 60 m <sup>2</sup>    | EA 7                      | 6.570               | %4,79         |
|                 |                             | 60 - 90 m <sup>2</sup> | EA 8                      | 7.615               | %5,56         |
|                 | 7 - 9 solairu               | < 60 m <sup>2</sup>    | EA 9                      | 6.985               | %5,10         |
|                 |                             | 60 - 90 m <sup>2</sup> | EA 10                     | 17.715              | %12,93        |
|                 |                             | 90- 120 m <sup>2</sup> | EA 11                     | 3.865               | %2,82         |
|                 | > 10 solairu                | < 60 m <sup>2</sup>    | EA 12                     | 3.970               | %2,90         |
|                 |                             | 60 - 90 m <sup>2</sup> | EA 13                     | 12.515              | %9,13         |
|                 |                             | 90- 120 m <sup>2</sup> | EA 14                     | 4.915               | %3,59         |
|                 | 1981 - 2005                 | 4 - 6 solairu          | 60 - 90 m <sup>2</sup>    | EA 15               | 5.470         |
| 7 - 9 solairu   |                             | 60 - 90 m <sup>2</sup> | EA 16                     | 6.760               | %4,93         |
| > 10 solairu    |                             | 60 - 90 m <sup>2</sup> | EA 17                     | 2.755               | %2,01         |
|                 |                             |                        | <b>EA totalak</b>         | <b>120.445</b>      | <b>%87,90</b> |

Ikus daitekeenez, etxebizitza adierazgarrien artean ez dago 2006. urtetik aurrera eraikitako etxebizitzarik, hau da, CTE araua betetzen duenik. Bestalde, Bilbo hiriaren bizitegi-parkearen karakterizazioaren ondorio nagusiak hurrengoak dira:

- Parke osoaren %50 1960tik 1980ra bitartean eraiki zen.
- Bilbo eraikin altuko hiria da. Etxebizitzen ia %50 7-9 solairuko eraikinetan kokatzen dira, eta beste %20 10 solairu baino gehiagoko eraikinetan.
- Etxebizitzen %55ak 60-90 m<sup>2</sup> bitarteko azalera erabilgarria du.

II.1.3. Etxebizitza adierazgarrietatik eraikin-arketipoetara

Orain arte, Bilboko bizitegi-parkearen karakterizazioa etxebizitza-moten adierazgarritasunaren arabera egin da. Hala ere, modelatu beharreko arketipoak eraikin osoak dira, eta ez etxebizitza

indibidualak. Beraz, etxebizitza adierazgarri bakoitzaren eta honek osatutako eraikinaren arteko erlazioa definitu beharra dago. Horretarako, hurrengo hurreratzea ezartzen da:

- Eraikin-arketipo bakoitzean kokatutako etxebizitza guztiak berdinak dira eta etxebizitza adierazgarri batekin bat datoz.
- Eraikin-arketipo bakoitzean solairu guztiak berdinak dira; hau da, etxebizitza kopuru eta azalera bera dute.

Horrela, definitu beharreko aspektu nagusia eraikin mota bakoitzaren etxebizitza kopurua da. Horretarako, eraikinen eraikuntza-aldia eta solairu-kopuruaren arabera distribuzioa etxebizitzarenekin gurutzatzen da, II.8. Taula lortuz. Beraz, etxebizitza-talde eta eraikin-moten arteko erlazioa hiru segmentazio-irizpideetatik bi baino ez kontsideratuz ezartzen da. Etxebizitzen azalera erabilgarria ez da honetarako kontuan hartzen; ondorioz, eraikin bakoitzeko etxebizitza-kopurua berdina izango da eraikitze-aldi eta solairu-kopuru bera duten etxebizitza-tipologia guztietan, hala nola EA 3, EA 4, EA 5 eta EA 6.

II.8. Taula: Bilboko bizitegi-eraikinen banaketa, eraikuntza-aldia eta solairu-kopuruaren arabera.

| Eraikitze-aldia | Solairu kopurua | Etxebizitza kopurua | Eraikin kopurua | Batez besteko etxebizitza kopurua eraikineko |
|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------|--|
| <1960           | 4 - 6 solairu   | 17.156              | 2.043           | 8,40   |
|                 | 7 - 9 solairu   | 24.992              | 1.795           | 13,92  |
| 1960 - 1980     | 4 - 6 solairu   | 13.972              | 1.069           | 13,07  |
|                 | 7 - 9 solairu   | 24.861              | 1.368           | 18,17  |
|                 | > 10 solairu    | 21.425              | 565             | 37,92  |
| 1981 – 2001 *   | 4 - 6 solairu   | 6.207               | 498             | 12,46  |
|                 | 7 - 9 solairu   | 6.695               | 367             | 18,24  |
|                 | > 10 solairu    | 2.422               | 62              | 39,06  |

\* Taula eraikitze INEren 2001. urteko errolda erabiltzen da, informazio hau 2011.ekotik kanpo geratu baitzen. Beraz 1981 – 2005 eraikitze-aldia, kasu honetan, 1981-2001 aldira hurbildu beharra dago.

Eraikin-arketipo bakoitzaren etxebizitza kopurua kalkulaturako batez besteko balioetik ahalik eta hurbilen egoteko definitzen da. Horretarako, eraikin-mota bakoitzaren solairu kopurua ere doitzen da, beti ere eraikin-mota horri dagokion solairu-kopuru tartearen barruan. Etxabeetan etxebizitzarik ez dagoela suposatuz, II.9. Taula lortzen da.

II.9. Taula: etxebizitza adierazgarriek osatzen dituzten eraikin-arketipoen solairu- eta etxebizitza-kopurua.

| Eraikitze-aldia      | Solairu kopurua | Eraikin-arketipoaren solairu kopurua | Eraikin-arketipoaren solairu kopurua, etxabe barik | Solairu bakoitzeko etxebizitza kopurua | Eraikin-arketipoaren etxebizitza kopuru erresultantea | Batez besteko etxebizitza kopurua eraikineko [111] |
|----------------------|-----------------|--------------------------------------|--|--|---|--|
| 1960a baino lehenago | 4 - 6 solairu   | 5                                    | 4  | 2                                      | 8   | 8,40   |
|                      | 7 - 9 solairu   | 8                                    | 7  | 2                                      | 14  | 13,92  |
| 1960 - 1980          | 4 - 6 solairu   | 5                                    | 4  | 3                                      | 12  | 13,07  |
|                      | 7 - 9 solairu   | 7                                    | 6  | 3                                      | 18  | 18,17  |
|                      | > 10 solairu    | 13                                   | 12   | 3                                      | 36  | 37,92  |
| 1981 - 2001          | 4 - 6 solairu   | 5                                    | 4  | 3                                      | 12  | 12,46  |
|                      | 7 - 9 solairu   | 7                                    | 6  | 3                                      | 18  | 18,24  |
|                      | > 10 solairu    | 14                                   | 13   | 3                                      | 39  | 39,06  |

Ikus daitekeenez, azaldutako hurbilketarekin eraikin-mota bakoitzarentzako lortutako etxebizitza kopuru erresultantea asko hurbiltzen da INEK emandako datu errealetara. Horrela, aurretik definitutako 17 etxebizitza adierazgarriak modelatu beharreko 17 eraikin-arketipoekin erlazionatzen dira, II.10. Taulak adierazten duen moduan.

II.10. Taula: etxebizitza adierazgarrien eta eraikin-arketipoen arteko erlazioa.

| Eraikin-arketipoa | Etxebizitza adierazgarria | Eraikitze-aldia      | Solairu kopurua, etxabe barik | Solairu bakoitzeko etxebizitza kopurua | Etxebizitzen azalera erabilgarria |
|-------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|--|-----------------------------------|
| 1. arketipoa      | EA 1                      | 1960a baino lehenago | 4                             | 2                                      | < 60 m <sup>2</sup>               |
| 2. arketipoa      | EA 2                      |                      | 4                             | 2                                      | 60 - 90 m <sup>2</sup>            |
| 3. arketipoa      | EA 3                      |                      | 7                             | 2                                      | < 60 m <sup>2</sup>               |
| 4. arketipoa      | EA 4                      |                      | 7                             | 2                                      | 60 - 90 m <sup>2</sup>            |
| 5. arketipoa      | EA 5                      |                      | 7                             | 2                                      | 90- 120 m <sup>2</sup>            |
| 6. arketipoa      | EA 6                      |                      | 7                             | 2                                      | > 120 m <sup>2</sup>              |
| 7. arketipoa      | EA 7                      | 1960 - 1980          | 4                             | 2                                      | < 60 m <sup>2</sup>               |
| 8. arketipoa      | EA 8                      |                      | 4                             | 2                                      | 60 - 90 m <sup>2</sup>            |
| 9. arketipoa      | EA 9                      |                      | 6                             | 2                                      | < 60 m <sup>2</sup>               |
| 10. arketipoa     | EA 10                     |                      | 6                             | 2                                      | 60 - 90 m <sup>2</sup>            |
| 11. arketipoa     | EA 11                     |                      | 6                             | 2                                      | 90- 120 m <sup>2</sup>            |

|                      |       |             |    |   |                        |
|----------------------|-------|-------------|----|---|------------------------|
| <b>12. arketipoa</b> | EA 12 |             | 12 | 3 | < 60 m <sup>2</sup>    |
| <b>13. arketipoa</b> | EA 13 |             | 12 | 3 | 60 - 90 m <sup>2</sup> |
| <b>14. arketipoa</b> | EA 14 |             | 12 | 3 | 90- 120 m <sup>2</sup> |
| <b>15. arketipoa</b> | EA 15 | 1981 - 2005 | 4  | 2 | 60 - 90 m <sup>2</sup> |
| <b>16. arketipoa</b> | EA 16 |             | 6  | 2 | 60 - 90 m <sup>2</sup> |
| <b>17. arketipoa</b> | EA 17 |             | 13 | 3 | 60 - 90 m <sup>2</sup> |

## II.2. Eraikin-arketipoen karakterizazioa

### II.2.1. Fatxada-konposizioak

Atal honek Bilboren eta Euskadiren eraikuntza-ezaugarri bereizgarriak aztertzen ditu, tokiko ikuspegi batetik.

#### II.2.1.1. Fatxaden bilakaera historikoa Euskadin

Antzinako eraikinen fatxadak karga-horma lodiz osatuta zeuden. Eraikinen estrukturan parte ziren eta masa eta inertzia termiko handia zuten. Materialei dagokienez, fatxadek aldaketa gutxi izan zuten XIX. mendera arte, adreiluzko fatxadek aurretiko harrizko hormak ordezkatu zituztenean. Bilboren kasuan, 7 cm-ko lodierako adreilua izan zen 1876 – 1910 aldiko apartamentu-bloketan erabilitako fatxada soluziorik ohikoena [112].

1910etik aurrera, Ingalaterra eta Frantziatik ekarritako hormigoi armatuak erabat aldatu zuen eraikitze modua [113]. Lehenengo aldiz, eraikinen inguratzailea estruktura-funtziotik aske geratu zen, eta horrek material gutxiago erabiltzea eta pisua arintzea baimendu zuen. Horrela, tartean aire-ganbera bat zuten orri bikoitzeko fatxaden erabilera zabaltzen hasi zen, baina Gerra Zibilak eta gerraosteak hedapen hori eten egin zuten 60ko hamarkada ingurura arte, Bilbok (eta, oro har, Euskadik) izugarritzko hazkunde demografikoa bizi izan zuenean.

1960 eta 1980 arteko Desarrollismo garaian, Euskadira migrazio handia eman zen Espainiako beste eskualde batzuetatik, euskal industrializazio-maila handia zela medio. Ondorioz, langileentzako eraikin ugari eraiki ziren oso epe laburrean, non orri bikoitzeko fatxadak orokortu baitziren [55].

Geroago, fatxaden eraikuntza-soluzioarekin lotutako hurrengo aldaketa esanguratsuen isolatzaileen erabilera aurkitzen da. 70. hamarkadan bi orrien arteko aire-ganberan isolatzaileak pixkanaka ipintzen hasi baziren ere, 1979. Urteko NBE-CT-79 arauak euren erabilera orokortu egin zuen, 1980ko hamarkadatik aurrera.

#### II.2.1.2. Euskal bizitegi-parkearen fatxada-soluzio bereizgarriak

Deskribatutako fatxaden eraikuntza-soluzioen ikuspegi orokorra osatzeko, atal honetan Euskadiren fatxada-soluzio bereizgarrietan sakontzen da literatura teknikoa aztertuz. Beste batzuen artean, hurrengo bi lanak azpimarra daitezke:



- Eusko Jaurlaritzaren Enplegu eta Gizarte Politiketako Sailak argitaratutako *Catálogo de Rehabilitación Energética* katalogoa [114], EHUren laguntzarekin, euskal parkearen ohiko fatxada-tipologiak identifikatzen dituena.
- *La construcción de la arquitectura residencial en Gipuzkoa durante la época del Desarrollismo* tesia [55], Desarrollismo garaiko eraikitze-prozesua ebaluatzen duena.

II.11. Taulak [114](e)k eraikitze-aldi bakoitzean identifikatutako fatxada-soluzioak laburbiltzen ditu. Beste lan batzuek bezala [53], horma bikoitzaren hasiera gerraostearen aroan ezartzen du, nahiz eta Desarrollismo garaira arte ez zen soluzio ohikoena bihurtu.

II.11. Taula: [114](e)k eraikitze-aldi bakoitzean identifikatutako fatxada-soluzioak.

| XIX. mendera arte            | < 1936                  | Gerra zibila eta gerraostea   | 1960 - 1980  | NBE-CT-79 1980 - 2006 |
|------------------------------|-------------------------|---|--|-----------------------|
| Adobezko horma               | 1/2' adreilu trinkoa    | Orri bikoitza, bistako adreilua, bi aldeetako estaldurarekin, "P. Unceta" | 1/2' hutsune bikoitzeko adreilu  | Hormigoizko blokeak   |
| Harri-horma                  | 1,5' zulatutako adreilu |   | Orri bikoitza, bistako adreilua  |                       |
| Konkorturiko adreilu trinkoa | 1' adreilu trinkoa      |   | Orri bikoitza, bistako adreilua, "J. Gayarre II"                             |                       |
|                              | 1' gafa adreilua        |   | Orri bikoitza, bistako adreilua, "J. Gayarre I"                              |                       |
|                              | 1,5' gafa adreilua      |   | Orri bikoitza, bistako adreilua, bi aldeetako estaldurarekin.                |                       |
|                              |                         |   | Orri bikoitza, bistako adreilua, bi aldeetako estaldurarekin, "Otxarkoaga I" |                       |
|                              |                         |   | Orri bikoitza, bistako adreilua, bi aldeetako estaldurarekin, "Belostikale"  |                       |

Desarrollismo garaiak Bilboko parkean duen garrantzia dela eta, xehetasun handiagoarekin aztertu dira orri bikoitzeko fatxadak. II.12. Taulan [114]-k euskal parkean identifikatutako orri bikoitzeko soluzioak deskribatzen dira.

II.12. Taula: [114]-k euskal parkeen identifikatutako orri bikoitzeko soluzioak.

| <b>Bistako adreiluzko fatxadak</b> |                                       |                          |                                    |                             |                     |
|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| <b>Kodea [EHU, 2014]</b>           | <b>Kanpoko orria</b>                  | <b>Aire-ganbera (cm)</b> | <b>Barneko orria</b>               | <b>U (W/m<sup>2</sup>K)</b> | <b>Lodiera (cm)</b> |
| <b>EXFC05b01</b>                   | 10,5 cm zulatutako adreilua           | 5                        | 4,5 cm hutsune sinpleko adreilua   | 1,62                        | 20                  |
| <b>EXFC05b02</b>                   | 10,5 cm zulatutako adreilua           | 10                       | 9 cm hutsune bikoitzeko adreilua   | 1,36                        | 29,5                |
| <b>EXFC05b03</b>                   | 10,5 cm zulatutako adreilua           | 7                        | 7 cm hutsune bikoitzeko adreilua   | 1,50                        | 24,5                |
| <b>EXFC05c01</b>                   | 10,5 cm adreilu trinkoa               | 5                        | 7,5 cm hutsune bikoitzeko adreilua | 1,28                        | 23                  |
| <b>Estaldura duten fatxadak</b>    |                                       |                          |                                    |                             |                     |
| <b>EXFC06a01</b>                   | 10,5 cm hutsune bikoitzeko adreilua   | 5                        | 4,5 cm hutsune sinpleko adreilua   | 1,42                        | 20                  |
| <b>EXFC06a02</b>                   | 11,5 cm hutsune hirukoitzeko adreilua | 5                        | 7 cm hutsune bikoitzeko adreilua   | 1,33                        | 23,5                |
| <b>EXFC06a03</b>                   | 12 cm hutsune bikoitzeko adreilua     | 8                        | 4 cm hutsune sinpleko adreilua     | 1,33                        | 24                  |
| <b>EXFC06a04</b>                   | 9 cm hutsune bikoitzeko adreilua      | 8                        | 9 cm hutsune bikoitzeko adreilua   | 1,28                        | 26                  |
| <b>EXFC06b01</b>                   | 12 cm zulatutako adreilua             | 8                        | 4 cm hutsune sinpleko adreilua     | 1,54                        | 24                  |
| <b>EXFC06b02</b>                   | 9 cm zulatutako adreilua              | 8                        | 9 cm hutsune bikoitzeko adreilua   | 1,42                        | 26                  |

Ikus daitekeenez, transmitantzia termikoari dagokionez ez dago ezberdintasun nabarmenik bistako adreiluzko fatxaden eta estaldura duten fatxaden artean. 1,28 eta 1,62 W/m<sup>2</sup>K bitarteko transmitantzia-diferentziak hormaren lodieraren eta adreilu-moten arabera dira. Gainontzeko ondorio nagusiak hurrengoak dira:

1. Bistako adreiluzko fatxadetan erabilitako adreilu mota ohikoena zulatutako adreilua da. Estaldura duten fatxadetan, aldiz, adreilu hutsak dira.
2. Fatxadaren barneko orria adreilu hutsez osatuta dago kasu guztietan.
3. Aire-ganberaren lodiera-tartea 5 – 10 cm-koa da.
4. Kanpoko orriaren lodiera-tartea 9 – 12 cm-koa da.
5. Fatxada osoaren lodiera-tartea 20 – 29,5 cm-koa da.

Ondorio hauek bat datoz aztertutako beste lan batzuekin. Lehenengo puntua bat dator Iñigo Lizundiaren tesiarekin [55], adreilu hutsa identifikatzen duena Desarrollismo garaiko estaldura duten fatxadetan oinarritzko soluziotzat. Badago ere beste lanik, bistako adreiluzko fatxadetan

ohikoena zulatutako adreilua erabiltzea zela adierazten duena [115]. Bigarren puntuari dagokionez, Iñigo Lizundiak aztertutako kasuen %90ean barneko orria adreilu hutsez osatuta zegoen [55]. Literaturako beste analisi batzuek ere ezaugarri berresten dute [115]. Aire-ganberaren kasuan ere, aipatutako lodiera tartea bat dator Iñigo Lizundiak aztertutako proiektu-dokumentuekin (5 – 11 cm bitartean zeudenak). Bestalde, beste lan baten arabera [113], Bizkaian eta Gipuzkoan “tabicón” moduko konfigurazioa da arruntena adreilu hutsez osatutako kanpoko orrietan, 7 – 9 cm-ko orri-lodierarekin bat datorrena. Bistako adreiluen kasuan, 12 cm-ko kanpo-orria adierazten du. Azkenik, Iñigo Lizundiak 20-35 cm-ko fatxada-lodierak aurkitu zituen Gipuzkoan, II.12. taularen tartearekin bat datozenak.

### II.2.1.3. Eraikinen Azterketa Teknikoen analisia

Euskadin, Eraikinen Azterketa Teknikoek (EAT) eraikinen egoerari buruzko informazioa ematen dute, kontserbazio-egoerari, irisgarritasun unibertsalaren arauetara adostasunari eta eraginkortasun energetikoari dagokionez. Derrigorrezkoak dira 50 urte baino gehiagoko eraikinetan, eta baita hiru alderdi horietako edozein hobetzeko diru-laguntzak eskatzen dituzten eraikinentzat ere.

EATen erregistro publikoan [116] ohar informatiboak daude eskuragarri, ikuskatutako eraikinen fatxaden osaerari buruzko informazioa dutenak. Erregistro hori erabiliz, 115 eraikineko lagin baten fatxadak aztertzen dira, guztiak 1980a baino lehen eraikiak. EATen helburu nagusia dela eta (eraikinen kontserbazio-egoera ikuskatzea), arraroagoa da eraikin berriagoetan topatzea.

EATk hurrengo fatxada motak bereizten ditu, inguratzailaren osaera eta funtzioaren arabera:

- Estructuralak diren karga-hormak.
- Fatxada tradizionala, ektuktura-funtziotik askea. Orri bakar zein bikoitzekoa.
- Fatxada teknologikoa, egitura-profil osagarriekin forjatuei lotuta.

II.13. Taulak aztertutako fatxada moten banaketa laburbiltzen du. Fatxada mota bat baino gehiago duten eraikinak badaudela aipatu beharra dago, eta baita ohar informatibo batzuek ez dutela fatxadari buruzko informaziorik.

II.13. Taula: aztertutako EATetako fatxada moten banaketa.

| Eraikuntza-aldia | Aztertutako eraikin kopurua | Fatxadari buruzko informazioa dutenak | Fatxada mota |              |              |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|                  |                             |                                       | Ektukturala  | Tradizionala | Teknologikoa |
| < 1960           | 48                          | 48                                    | 10           | 40           | 0            |
| 1960 - 1980      | 67                          | 65                                    | 1            | 64           | 1            |

Eraikuntza-metodoen bilakaerarekin bat etorritik, eta funtzio ektukturalak betetzeko hormigoi armatuaren hedapenaren ondorioz, fatxada ektukturalak eraikin zaharragoetan

kontzentratzen dira, ondoren ia desagertu arte. Hain zuzen ere, aztertutako fatxada estruktural gehienak Gerra Zibilaren aurretiko eraikinei dagozkie.

Bestalde, EATEk fatxada baten bi elementu nagusiak aztertzen dituzte: alde batetik, fatxada bera, itxitura elementu edo euskarri gisa eta, bestetik, bere estaldura edo azken geruza. Fatxada tradizionalen euskarriak gehienak adreiluz osatuta daude, 1960 aurreko eraikinetan eta baita 1960-1980 aldikoetan ere (II.14. Taula).

II.14. Taula: aztertutako EATEtako fatxada tradizionalen euskarrien banaketa.

| Eraikuntza-aldia | Fatxada tradizionala duten eraikinak | Fatxada tradizionalak – Euskarria       |          |           |
|------------------|--------------------------------------|---|----------|-----------|
|                  |                                      | Euskarriari buruzko informazioa dutenak | Adreilua | Hormigoia |
| < 1960           | 40                                   | 34                                      | 33       | 1         |
| 1960 - 1980      | 64                                   | 57                                      | 56       | 1         |

Fatxaden estaldurari edo akaberari dagokionez, EATEk estaldura jarraitua (morteroa, pintura, etab.) eta estaldura itsatsia (zeramikoa, bistako adreilua, etab.) bereizten ditu. II.15. Taulan aztertutako fatxada moten banaketa adierazten da, estaldura itsatsien artean bistako adreiluak bereiziz.

II.15. Taula: aztertutako EATEtako fatxada tradizionalen estalduren banaketa.

| Eraikuntza-aldia | Fatxada tradizionala duten eraikinak | Estaldurari buruzko informazioa dutenak | Fatxada tradizionalak – Estaldura |                    |                  |  |
|------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------------|--------------------|------------------|--|
|                  |                                      |   | Estaldura jarraitua               | Estaldura itsatsia | Bistako adreilua | Estaldura mistoa: jarraitua + itsatsia |
| < 1960           | 40                                   | 36                                      | 19                                | 0                  | 9                | 8                                      |
| 1960 - 1980      | 64                                   | 61                                      | 24                                | 6                  | 19               | 12                                     |

Ikus daitekeenez, estaldura jarraitua da fatxada tradizionaletan soluziorik ohikoena, literaturan adierazi den moduan [112]. Estaldura itsatsiek eta bistako adreiluek gora egin zuten Desarrollismo garaian. Hain zuzen, 60ko hamarkadatik aurrera, zeramikazko estaldurak eta bistako adreiluak oso ezagunak bihurtu ziren [117].

#### II.2.1.4. Modelatutako fatxadak

Burututako analisisian oinarrituta, modelatutako eraikin-arketipo eruedetan erabilitako fatxada-osaerak II.16. Taulan adierazten dira. Material-geruzak fatxadaren kanpotik barrurako ordenan agertzen dira. Halaber, 0,13 eta 0,04 m<sup>2</sup>K/W-ko barne- eta kanpo-erresistentziak definitu dira, hurrenez hurren.



II.16. Taula: modelatutako eraikin-arketipo ereduetan erabilitako fatxada-osaerak.

|                            |                     | Lodiera (cm) | Eroankortasuna (W/mK)       | Bero espezifiko (J/kgK) | Dentsitatea (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|---------------------|--------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| <b>1. Fatxada</b>          | Kareharria          | 40           | 1,5                         | 720                     | 2.180                            |
|                            | Zementuzko morteroa | 2            | 0,72                        | 920                     | 1.850                            |
|                            | Igeltuzko luzitua   | 1            | 0,4                         | 1.000                   | 1.000                            |
| <b>Fatxadaren U-balioa</b> |                     | <b>2,043</b> | <b>W/m<sup>2</sup>K</b>     |                         |                                  |
|                            |                     | Lodiera (cm) | Eroankortasuna (W/mK)       | Bero espezifiko (J/kgK) | Dentsitatea (kg/m <sup>3</sup> ) |
| <b>2. Fatxada</b>          | Zementuzko morteroa | 2            | 0,72                        | 920                     | 1.850                            |
|                            | Zulatutako adreilua | 24           | 0,76                        | 1.000                   | 1.600                            |
|                            | Zementuzko morteroa | 2            | 0,72                        | 920                     | 1.850                            |
|                            | Igeltuzko luzitua   | 1            | 0,4                         | 1.000                   | 1.000                            |
| <b>Fatxadaren U-balioa</b> |                     | <b>1,766</b> | <b>W/m<sup>2</sup>K</b>     |                         |                                  |
|                            |                     | Lodiera (cm) | Eroankortasuna (W/mK)       | Bero espezifiko (J/kgK) | Dentsitatea (kg/m <sup>3</sup> ) |
| <b>3. Fatxada</b>          | Zementuzko morteroa | 1            | 0,72                        | 920                     | 1.850                            |
|                            | Adreilu hutsa       | 11,5         | 0,49                        | 1.000                   | 1.200                            |
|                            | Aire-ganbera        | 5            | R = 0,18 m <sup>2</sup> K/W |                         |                                  |
|                            | Adreilu hutsa       | 7            | 0,49                        | 1.000                   | 1.200                            |
|                            | Zementuzko morteroa | 2            | 0,72                        | 920                     | 1.850                            |
|                            | Igeltuzko luzitua   | 1            | 0,4                         | 1.000                   | 1.000                            |
| <b>Fatxadaren U-balioa</b> |                     | <b>1,259</b> | <b>W/m<sup>2</sup>K</b>     |                         |                                  |



|                            |                     | Lodiera (cm) | Eroankortasuna (W/mK)       | Bero espezifikoa (J/kgK) | Dentsitatea (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|---------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| <b>4. Fatxada</b>          | Zulatutako adreilua | 10,5         | 0,76                        | 1.000                    | 1.600                            |
|                            | Aire-ganbera        | 5            | R = 0,18 m <sup>2</sup> K/W |                          |                                  |
|                            | Adreilu hutsa       | 9            | 0,49                        | 1.000                    | 1.200                            |
|                            | Zementuzko morteroa | 2            | 0,72                        | 920                      | 1.850                            |
|                            | Igeltsuzko luzitua  | 1            | 0,4                         | 1.000                    | 1.000                            |
| <b>Fatxadaren U-balioa</b> |                     | <b>1,380</b> | <b>W/m<sup>2</sup>K</b>     |                          |                                  |
|                            |                     | Lodiera (cm) | Eroankortasuna (W/mK)       | Bero espezifikoa (J/kgK) | Dentsitatea (kg/m <sup>3</sup> ) |
| <b>5. Fatxada</b>          | Zulatutako adreilua | 10,5         | 0,76                        | 1.000                    | 1.600                            |
|                            | Artile minerala     | 4            | 0,038                       | 840                      | 140                              |
|                            | Adreilu hutsa       | 9            | 0,49                        | 1.000                    | 1.200                            |
|                            | Zementuzko morteroa | 2            | 0,72                        | 920                      | 1.850                            |
|                            | Igeltsuzko luzitua  | 1            | 0,4                         | 1.000                    | 1.000                            |
| <b>Fatxadaren U-balioa</b> |                     | <b>0,626</b> | <b>W/m<sup>2</sup>K</b>     |                          |                                  |
|                            |                     | Lodiera (cm) | Eroankortasuna (W/mK)       | Bero espezifikoa (J/kgK) | Dentsitatea (kg/m <sup>3</sup> ) |
| <b>6. Fatxada</b>          | Zulatutako adreilua | 10,5         | 0,76                        | 1.000                    | 1.600                            |
|                            | Artile minerala     | 2            | 0,038                       | 840                      | 140                              |
|                            | Adreilu hutsa       | 9            | 0,49                        | 1.000                    | 1.200                            |
|                            | Zementuzko morteroa | 2            | 0,72                        | 920                      | 1.850                            |
|                            | Igeltsuzko luzitua  | 1            | 0,4                         | 1.000                    | 1.000                            |
| <b>Fatxadaren U-balioa</b> |                     | <b>0,934</b> | <b>W/m<sup>2</sup>K</b>     |                          |                                  |

|                            |                     | Lodiera (cm) | Eroankortasuna (W/mK)   | Bero espezifiko (J/kgK) | Dentsitatea (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|---------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| <b>7. Fatxada</b>          | Zulatutako adreilua | 10,5         | 0,76                    | 1.000                   | 1.600                            |
|                            | Artile minerala     | 3            | 0,038                   | 840                     | 140                              |
|                            | Adreilu hutsa       | 9            | 0,49                    | 1.000                   | 1.200                            |
|                            | Zementuzko morteroa | 2            | 0,72                    | 920                     | 1.850                            |
|                            | Igeltsuzko luzitua  | 1            | 0,4                     | 1.000                   | 1.000                            |
| <b>Fatxadaren U-balioa</b> |                     |              |                         |                         |                                  |
|                            |                     | <b>0,750</b> | <b>W/m<sup>2</sup>K</b> |                         |                                  |

5, 6 eta 7. fatxadei isolatzaile-geruza bat sartu zaie, artile mineral moduan, 1981etik gerozko eraikinei esleituko baitzaizkielako. Isolatzaile honen lodiera NBE-CT-79 arauaren eskakizunetan oinarrituta definitu da, ondoren azaltzen den moduan:

- NBE-CT-79 arauaren 2. maparen arabera Bilbo W klima-eremuan dagoenez, eraikinen fatxadek izan dezaketen transmitantzia termiko maximoa 1,8 W/m<sup>2</sup>°C-ko baliora mugatuta dago. Modelatutako 5, 6 eta 7. fatxadek eskakizun hau betetzen dute.
- Gainera, NBE-CT-79 arauak K<sub>G</sub> koefiziente moduan definitutako transmitantzia termiko maximo bat ere ezartzen du, eraikin osorako. K<sub>G</sub> koefizientea zonalde klimatikoaren, berokuntzarako erabilitako energia-iturriaren eta eraikinaren forma-faktorearen arabera da. Bilbo C zonalde klimatikoari dagokio, eta I. kasua (erregai solidoa, likidoa edo gaseosoa) kontsideratu da berokuntzarako.

Beraz, 1981 osteko eraikin-arketipo bakoitzean, forma-faktore ezberdina dutenak, material isolatzailearen lodiera desberdinekin iteratzen da K<sub>G</sub> koefiziente orokorra bete arte. Horrela, hiru lodiera-balio lortzen dira, 2 cm, 3 cm eta 4 cm, hurrenez hurren 6., 7. eta 5. fatxadei esleitzen zaizkienak.

#### II.2.1.4.1 Definitutako fatxada-moten esleipena

1. fatxada kareharri astunez osatutako fatxada estrukturala da eta, beraz, eraikin-arketipo zaharrenari esleitu zaio. Azken hau 3. arketipoa da, geroago deskribatzen den moduan Alde Zaharrari eta bere inguruari dagokiona. Orri bakarreko beste fatxada (2. fatxada) 1960 baino lehenagoko eraikitze-aldiari dagokion gainerako arketipoei esleitzen zaie.

Halaber, isolamendu termikorik gabeko orri bikoitzeko fatxadak, 3. fatxada eta 4. fatxada hain zuzen, Desarrollismo garaiko (1960-1980) eraikin-arketipoei esleitzen zaizkie. Azkenik, isolatutako orri bikoitzeko fatxadak (5, 6 eta 7. fatxadak) 1981aren osteko hiru eraikin-arketipoetan sartzen dira. Bakoitzari berea esleitzen zaio, NBE-CT-79 arauaren eskakizunak betetzeko burututako iterazio-prozesuen emaitzen arabera.

II.17. Taulak eraikin-arketipo bakoitzari esleitutako fatxada mota laburbiltzen du.

II.17. Taula: eraikin-arketipo bakoitzari esleitutako fatxada mota.

| Eraikin-arketipoa | Eraikitze-aldia  | Fatxada mota                                    |
|-------------------|------------------|---|
| 1. Ark.           | 1960 baino lehen | 2. Fatxada<br>$U = 1,766 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 2. Ark.           |                  | 2. Fatxada<br>$U = 1,766 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 3. Ark.           |                  | 1. Fatxada<br>$U = 2,043 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 4. Ark.           |                  | 2. Fatxada<br>$U = 1,766 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 5. Ark.           |                  | 2. Fatxada<br>$U = 1,766 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 6. Ark.           |                  | 2. Fatxada<br>$U = 1,766 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 7. Ark.           | 1960 - 1980      | 3. Fatxada<br>$U = 1,259 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 8. Ark.           |                  | 3. Fatxada<br>$U = 1,259 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 9. Ark.           |                  | 3. Fatxada<br>$U = 1,259 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 10. Ark.          |                  | 4. Fatxada<br>$U = 1,380 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 11. Ark.          |                  | 3. Fatxada<br>$U = 1,259 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 12. Ark.          |                  | 4. Fatxada<br>$U = 1,380 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 13. Ark.          |                  | 4. Fatxada<br>$U = 1,380 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 14. Ark.          |                  | 4. Fatxada<br>$U = 1,380 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 15. Ark.          | 1981 - 2005      | 5. Fatxada<br>$U = 0,626 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 16. Ark.          |                  | 6. Fatxada<br>$U = 0,934 \text{ W/m}^2\text{K}$ |
| 17. Ark.          |                  | 7. Fatxada<br>$U = 0,750 \text{ W/m}^2\text{K}$ |



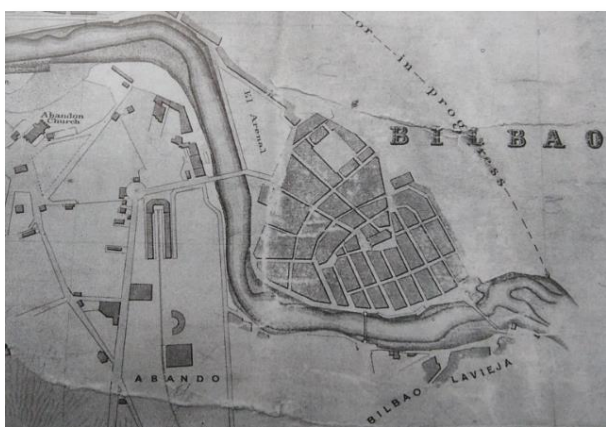
## II.2.2. Hiri-morfologia

Atal honetan Bilboko hiri-morfologiaren azterketa aurkezten da, eraikin-arketipo bakoitzaren propietate geometrikoak zehazteko burutu dena, hala nola, forma eta jarraitasuna. Hasieran, Bilboko hiri-garapen historikoa aztertzen da, hiriaren hiri-morfologia eremuak hobeto ulertu eta sailkatzeko. Ondoren, proposatu den metodologiaren bidez eraikin-arketipo bakoitzari bere forma eta jarraitasuna esleitzen zaio.

### II.2.2.1. Bilboko hiri-garapen historikoa

Bilboko hiri-garapenak bere izaera topografiko konplexuarekin ez ezik, lotura estua du garai bakoitzeko faktore historiko eta sozioekonomikoekin ere. XIX. mendearen amaieratik aurrera, eta XX. mendearen gehiengoan, bi arazo nagusi izan ziren. Batetik, lur-eskasia eta, bestetik, honekin eta landa-eremuetako etengabeko migrazioarekin erlazionatuta, langile-klaserako behar adina etxebizitza falta.

Sei mendetan zehar Bilbo merkataritza-hiria izan zen, Alde Zaharraren mugen barruan mantendu zena (II.2. Irudia). Merkataritza-hiri izaeratik hiri industrialerako aro aldaketaren unea 1876. urtean ezarri daiteke. Hirugarren Gerra Karlistaren amaierak eta, batez ere, Abando lautadaren Bilboko Hedapen Proiektuaren onarpenak, eraikitze-aldi garrantzitsu bati eman zioten hasiera, XIX. mendearen azken laurdenean hiriak jasan zuen meatzaritza-, industria- eta finantza-hazkundearekin batera gertatu zena.



II.2. Irudia: Bilbok 1873an zuen hedapena [112].

Abandoko Zabalgunea eraikitzeak, Nerbioi ibaiaren ezkeraldera zeharkatzea zekarrena, hamarkada asko iraun zuen. Campo Volantin eremuarekin batera, burgesiarentzat erreserbatuta egon zen hasieratik. Biztanleen gehiengoa, berriz, Alde Zaharra eta bere aldirietan pilatzen zen. XX. mendearen hasieran, lehenago Abandoko landa-lautada izan zena eraikinez beteta zegoen jada, Errekaldeko zumarkalean, San Mameseko zumarkalean eta Zababuruk itxitako eremuan. Bere hiri-morfologia XIX. mendeko bloke solido bereizgarriez osatuta zegoen, lur-zati erregularretan kokatuak.

Bitartean, Alde Zaharrean lursail hutsak bete eta fatxadak lerrokatu egin ziren arren, auzo berriak behar ziren immigrazioa egokitzeko. Erronda eta Iturribide kaleak lotzen dituen eremuranzko hedapena aipa daiteke hemen, geroago Solokoetxerantz luzatuko zena, edota

Atxuriko auzoa (Ollerías eremua) ere. Hala ere, Bilbo Zaharra izan zen garai hartan gehien hazi zen auzoa (II.3. Irudia).



II.3. Irudia: Bilbok 1901an zuen hedapena [112].

XIX. mendearen amaierako auzo berri guztietan antzeko eskema bat errepikatu zen: gehienez 6 solairuko apartamentu-blokeak eraiki ziren, beste eraikin batzuen artean kokatuak, patio txiki bat eta solairu bakoitzean bi etxebizitza zituztenak, kalearekiko simetrikoak izanez. Etxabeko etxebizitzak ez ziren ohikoak. Auzoen arteko ezberdintasunak eraikinaren kanpo-apaindurari eta etxebizitzaren azalerarekin lotuta zeuden. Azken hau 100 – 200 m<sup>2</sup> artean egon zitekeen Abandoko Zabalgunean, eta 40 – 80 m<sup>2</sup> bitartean aldirietan [112].

Alde Zaharraren eta haren aldirien pilaketak, Zabalguneko lurren kostu handiak eta inguruko eremu batzuen egoera juridiko bereziak (Udalak ez zuen horien gaineko zuzeneko aginpiderik), oso erakargarriak bihurtu zituzten azken eremu hauek. Horrela, Basurtu, Errekalde (Errekaldeberri, Iturrigorri, Larraskitu, Peñascal) edo Tivoliko hainbat sektore hazten hasi ziren, eta euren kontrol ezak 1906an ordenantza berriak onartzera behartu zuen Udala, eremu guztietan aplikatu behar zirenak.

Industrializazio azkarraren ondorioz, Bilboko eta bere inguruko populazioa 65.468 biztanletik 168.757 biztanlera igo zen 1877-1900 bitarteko aldirian. Osasungarritasun, produktibitate eta bake sozial arrazoiak zirela medio, etxebizitza sozialak eraikitze beharra onartu zen. Horrela, mende-aldaketak higienari, funtzionaltasunari edo itzulera ekonomikoari buruzko eztabaida ekarri zuen, geroago gerraosteko garaian zabaldu egingo da. 1910. urtera arte, etxebizitza-eskaintza merkatu libreko arauen mende zegoen soilik. Etxebizitza Merkeen Lehen Legearekin (1911), Administrazioak etxebizitza duinen eskaintza zerbitzu publiko gisa kontsideratzen hasi zen. Lege honek kooperatiba bidezko etxebizitzaren eraikuntza sustatu zuen, kenkari fiskalen, lurren desjabetzeen eta abarren bidez. Geroago, Etxebizitza Merkeen Bigarren Legeak (1921) eta Hirugarrenak (1924) lehenengoari jarraitu zioten.

Hasiera batean, lege horietaz baliatuz, Bilbon dentsitate handiko apartamentu-blokeak eraiki ziren Torre Urizar (Irala), Solokoetxe edota La Cruzen (Mallona). Baina Espainiako Gobernuaren dentsitate txikiko proiektuen alde agertu zen, egokiak ez zirenak langile-klasearen etxebizitza-eskasiari aurre egiteko. Gainera, diru-laguntzez baliatzeko gutxieneko errenta bat finkatu zen, handiegia zena langile-klasearentzat, eta jabetza sustatu zen alokairuaren ordez. Horrela, azkenean legeek klase ertainari egin zioten mesede batez ere.



II.4. Irudia: Torre Urizarreko eraikinak [118].

Horren ondorioz, lorategi-hiri periferikoko eredu bat nagusitu zen, Artxanda muinoaren hegaletan kokatutako familia bakarreko etxez osatuta zegoena (100 m<sup>2</sup>-tik gorako etxebizitza-azalerekin) [119]. Adibide gisa Ciudad Jardín (Uribarri), Zurbaran (Begoña), Buena Vista (Deustu) eta Talleres de Deusto (Deustu) aipa daitezke. Bilbon, aldiz, dentsitate txikiko etxebizitza gutxi eraiki ziren langileentzat. Hauek elementu apaingarririk gabeko barrakoi antzekoak ziren, lerro jarraitu eta paraleloetan eraikiak. Antigua Jabonera de Tapia y Sobrino (Zorrotza) edota Unión Begoñesa (Santutxu) dira honen adibide.

Guztira, 22 etxe merkeen kooperatiba eraiki ziren Bilbon 1911 eta 1936 bitartean, eta horietatik 5 baino ez ziren dentsitate handikoak [119]. Horrela, dentsitate txikiko etxe merkeen garapenak etxebizitza-eredu berri bat gauzatu zuen, argiaren eta aireztapenaren ideal higienikoari lotua, eta bloke solidoetan eraikitako apartamentu-eraikin tradizionaletatik urruntzen zena [118]. Hala ere, dentsitate txikiko etxe hauek lan honen analisitik kanpo geratu dira, familiabakarrekoak izateagatik edota euren solairu kopuru murriztuagatik.

Hala ere, etxebizitza merkeek periferiako eraikin gisa arrakasta izan arren, apartamentu-bloke tradizionalak jarraitu zuen eraikuntza-tipologia ohikoena izaten, 1906ko ordenantzen bidez sustatua. Izan ere, sektore pribatuak errendimendu ekonomikoa handiagoa lortzen zuen baimendutako gehieneko altuera zuten apartamentu-eraikinekin, dentsitatea ahalik eta gehien maximizatuz. Horrela, 6 eta 7 solairuko eraikinak ohikoak izan ziren garai hartan [118].

Dentsitate handiko eraikinen artean, apartamentu-bloke hauen alternatiba bat definitzeko saiakera bat Solokoetxen (1931) aurki daiteke, XIX. mendeko hiri-morfologiatik urrunduz. Emiliano Ammanek, Torre Urizarren oinarrituta, U formako eraikin bat diseinatu zuen, eremu libre eta irekiekin. Etxebizitza banaketaren ikuspegitik, korridoreak deuseztatu zituen espazio erabilgarria ahalik eta gehien ustiatzeko [118]. Proiektu horrek etxebizitza merkeen eta apartamentu-bloke tradizionalaren alternatiba gisa ekarritako gogoetak gerraostean hedatuko ziren.

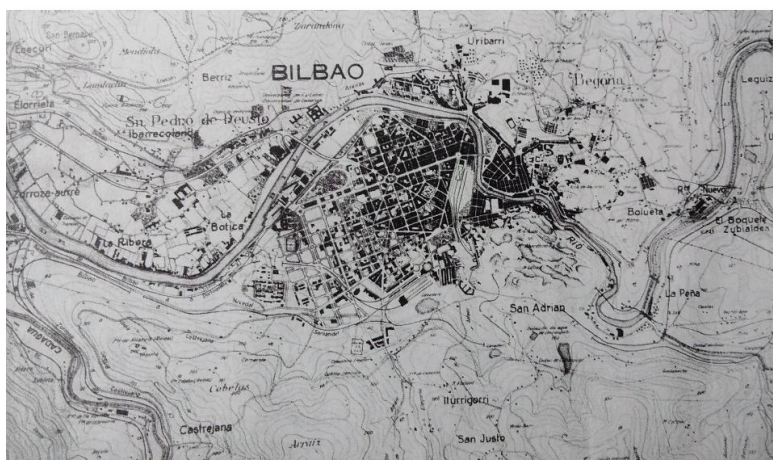
Bitartean, Deustu eta Begoñaren anexioa gauzatu zen (1925), baina eremu horietako eraikuntza-jarduera ez zen diktadura frankistara arte hedatu. Gerra Zibilaren amaieran, Etxebizitza Sozialaren Legearen bidez (1939), Erregimenak etxebizitza sozialeko politika bati ekin zion eta bi estatu-entitate sortu ziren:

- *Instituto Nacional de Vivienda*, etxebizitzak ordenantzen bidez arautu eta diru-laguntzak kudeatzen zituena, 1957an Etxebizitza Ministerioa sortu zen arte.
- *Obra Sindical del Hogar y la Arquitectura, OSHA*, etxebizitzaren sustapen publikoa kudeatzeaz arduratzen zen erakunde eraikitzailea.

Lege berriaren helburua etxebizitza soziala sustatzea zen, etxebizitzaren prezioaren eta tamainaren (eta ez onuradunaren errentaren) araberako diru-laguntzekin. Arrazionalismoaren ideiekin bat eginez, eraikitzeko beste modu bat proposatu zen, XIX. mendeko zabalguneen hiri-morfologiaren espazioaren erabilera eta lorategi-hirien higie-abantailak batzen zituena. Eraikinak barne-lorategi patio baten inguruan bil zitekeen, edota bloke irekietan (linealak, U formakoak, H formakoak, etab.). Oro har, onartutako eraikinek 5 solairu zituzten gehienez [118].

Hala ere, etxebizitzaren banaketa (eta azalera) zaharkitutako familia ugari tradizionalarentzat bideratuta egoteak, etxebizitzaren jabetza sustatzeak eta errentagarritasun-irizpideen lehenesteak mugatu egin zuten, berriro ere, etxebizitza hauen hedapena, ez baitzeuden momentu hartako errealitatera egokituta. Gainera, erregimen berriaren ideologiarekin bat, landa etxebizitzak sustatu ziren batez ere [118].

Garai horretan, porrot finantzarioko egoeran zegoen Bilboko Udalak bi modu nagusitan saiatu zen etxebizitzaren eraikuntza sustatzen. Alde batetik, Etxebizitza Sozialaren Legeak ezarritako finantziarioaz baliatzen saiatu zen, 1.000 etxebizitza berri eraikitzea proposatuz. Etxebizitza horiek hiriaren periferian banatzen ziren (Solokoetxe, Santutxu, Basurtu, Deustu), eta finantziario handia eskatzen zuten. Azkenean, finantziario-ekasiala zela eta, proposamen gehienak baztertu behar izan ziren, eta Bilboko Udalak *Viviendas Municipales Sociedad en Comandita* sozietate berria sortu zuen, akzioen bidez kapital pribatua erakartzeko. Torre Madariaga (Deustu) taldea sustatu zen horrela, non bederatzi bloke lineal eta paralelo eraiki ziren 1941 eta 1951 artean. Guztira 685 etxebizitza, 4 solairutan banatuak, eta 52 – 80 m<sup>2</sup> bitarteko azalera zutenak. Torre Madariagak beharrezko etxebizitza-azalera minimoa eta arrazionalismoaren jolas-eremu irekien kontzeptu higienikoa konbinatu zituen [119].



II.5. Irudia: Bilboko mapa topografikoa, 1943 [119].

Aldi berean, Bilboko Udala Indautxun eta San Mamesen inbertsio pribatua sustatzen saiatu zen, zerga politika berriekin eta urbanizazioa hobetuz. Sortutako etxebizitza-agentziekin klase

altu eta ertainari bideratutako inbertsioak handitzen hasi ziren. 1939an Udalari eskatutako Zabalgunerako eraikuntza-lizentziak 4 baino ez baziren izan, 1944an 30 lizentzia baino gehiago eskatu ziren [119].

Bitartean, 1943an Lehen Etxebizitza Plana aurkeztu zen hamar urtetan 1.396.257 etxebizitza eraikitzeko helburuarekin, Estatuak %25 finantzatuta. Honekin lotuta 1945ean OSHA 1.069 etxebizitza eraikitzen hasi zen Bilbon, San Inazio auzoa sortuz, garai hartako proiektu handienaren bidez (1950ean amaitu zen). Hiri-morfologiari dagokionez, 60 – 100 m<sup>2</sup>-ko etxebizitzak 4-5 solairuko bloke linealetan banatu ziren. Bloke paraleloak, U formakoak edota barne-patioa zuten etxadi itxiak eratzen zituzten, argia eta aireztapena bilatuz eta, horrela, XIX. mendeko bloke itxietatik desberdinduz.

Torre Madariagaren finantzaketaren soberakinekin, 1949an Udalak beste etxebizitza-talde handi bat sustatu zuen Santutxun. Parroco Unceta izeneko talde hau bloke lineal eta paraleloetan banatzen zen, Torre Madariaga bezala, baina etxebizitzetara dagokionez “etxebizitza minimo” kontzeptua aztertu zuen. 528 etxebizitzek 45 eta 79 m<sup>2</sup> bitarteko azalera zuten. Solokoetxe eta Corteseko promozioak ere aipa litezke Udalak sustatutako etxebizitzaren adibide gehigarri (eta txikiago) gisa. Guztira, 1937 eta 1950 artean Bilbon 2.000 etxebizitza publiko inguru eraiki ziren, %50 inguru Udalak sustatuta eta beste %50 estatuak (OSHAk San Inazio) [118].

Erakunde publikoek etxebizitza eta eraikin-blokeen banaketa berriak probatzen zituzten bitartean, “etxebizitza minimoaren” kontzeptuaren arabera, sektore pribatuak sustatutako etxebizitzek ez zuten berrikuntzarik sartu. Errentagarritasun handiena bilatzen jarraitu zuten, eraikinaren altuera maximizatzen eta eraikin-patioak minimizatzen zituzten apartamentu-bloke tradizionalen bidez. Horrela, Indautxu and Campo Volantinen XIX. mendeko hiri-morfologia hedatzen jarraitu zen.

Laburbilduz, 1950erako onartuta zegoen etxebizitzaren arazoari aurre egiteko irtenbiderik onena eraikin-blokeak zirela, aurretiko etxe merkeen dentsitate baxuko kontzeptuak eta diktaduraren hasierako landa-esperientziak porrot egin ondoren. Hala ere, sustatutako etxebizitza-kopurua Lehen Etxebizitza Planak espero zuena baino askoz txikiagoa izan zen eta, Bilbon, barriadak ugaritu egin ziren [119].

Horren aurrean, Estatuak 1954ean Errenta Mugatuko Etxebizitzaren Legea onartu zuen, “etxebizitza minimoko” kontzeptua sustatuz (ordutik aurrera, zenbat eta txikiagoa izan etxebizitzaren prezioa, orduan eta handiagoa zen finantziarioa) eta, ondoren, Etxebizitzaren Plan Nazionala, hura kudeatzeko. Bilbon, Plan horretaz baliatutako lehen promozioak Torre Urizar eta Errekalden kokatutako 1.000 etxebizitza izan ziren. Horietatik, %80ak 50 – 60 m<sup>2</sup> zituzten [119]. Geroago, 1957an sortutako Etxebizitzaren Ministerioaren politikak etxebizitza publikozko ekimenetik sektore pribaturanzko aldaketa eragin zuen. Aspektu ekonomikoek lehenetsia izan zuten, eraikigarritasun parametroak handituz.

Hala ere, 50. hamarkadaren amaieran, etxebizitzarekin lotutako larrialdi sozialak, Bilboko muinoetan zehar barreiatutako barriadekin, zuzenean 3.572 etxebizitza finantzatzera bultzatu zuen Gobernuak, Otxarkoagako auzoa sortuz. Bere hiri-morfologia berria poligonoetan oinarritzen zen, 50 – 70 m<sup>2</sup>-ko etxebizitzak, batez ere, 6 solairura bitarteko bloke linealetan banatuz eta altuagoak ziren dorreak ere tartekatuz.



#### II.6. Irudia: Otxarkoaga auzoa [119].

Otxarkoagaren proiektua 1959ko abenduan aurkeztu zen eta 1961ean bukatu. Estilo arrazionalistaren kasu paradigmaticoa da, Gerra Zibila baino lehen sortu zenetik atzerapen handiarekin hedatu zena, 1950eko hamarkadan pixkanaka haziz eta 60ko hamarkadan nagusi bihurtuz. Horrela, Desarrollismo garaian zehar estilo horretako auzo periferiko berriak sortu ziren, euren eraikinen altueraren hazkundea oso bereizgarria izanik (70eko hamarkadaren hasieran, Pariseko eta Madrilgo biztanle-dentsitatea 356 eta 384 bizt./ha zen, hurrenez hurren; Bilbon, berriz, 543 bizt./ha [120]).

Garai hartako proiektu nagusiak Begoña eta Txurdinagakoak ziren non, 1961 planen arabera, 6.954 eta 3.924 etxebizitza eraikitzea espero zen, hurrenez hurren [120]. Baina arauekin eta hiri-kudeaketarekin lotutako kontuek eraikuntza-helburuen porrota eragin zuten. 70eko hamarkada arte, Udalak eta Etxebizitza Ministerioak planen zenbait berrikuspen jarraitu egin zituzten eta, ondorioz, hasierako proiektuen espiritua lausotu egin zen, eremu horien azken hiri-forma aurreikustea zailduz. Plangintza egin eta 20 urtera, hasieran espero ziren 10.470 etxebizitzetatik 2.128 baino ez ziren eraiki, Begoña eta Txurdinaga artean. Horrela, neurri handi batean, Txurdinaga auzoa 80ko hamarkadako bilakaeraren emaitza da, bere bizitegi-dorre independente bereizgarri gehienak eraiki zirenean.

Begoña eta Txurdinagaren hiri-diseinuari buruzko etengabeko ziurgabetasuna garai hartako eraikitze-boomean Bilbok izandako hazkunde anarkikoaren sintomatikoa da. Hiria modu anarkikoan eta ekimen independenteen bidez hazi zen, eta Udala ez zen gai izan espekulazioa geldiarazteko eta antolaketa nahikoa ezartzeko.

80ko hamarkadarako eraikuntzaren goraldia bukatuta zegoen. Hortik aurrera, bizitegi-eraikin berriak tarte irregularretan eraiki ziren, hirian zehar nahiko banatuta. Bi gune adierazgarri aipa daitezke hemen: Amezola eta Miribilla. Amezolan 900 etxebizitza eraiki ziren, 15 solairuko dorreetan banatuak, lehenago tren geltoki batek betetzen zuen eremuan. Miribilla 1999an urbanizatu zen eta 1.000 etxebizitza berri inguru eraiki ziren orduetik aurrera.

#### II.2.2.2. Eraikin-arketipoen forma eta jarraitasuna

II.2.2.2.1. atalak Bilbo hiriaren bilakaera historiko orokorra aztertzen du, auzo ezberdinei dagokien hiri-morfologia azaltzen duena. Hala ere, eraikin-arketipoen simulazio energetikoa

burutzeko, bakoitzaren forma eta jarraitutasuna zehaztu beharra dago. Horretarako, metodologian azaldutako prozedura aplikatzen da.

Lehenik eta behin, Bilboko hiri-morfologiak aztertzen dira, hau da, eraikinek osatzen dituzten hiri-ehun ezberdinak, prozedura aplikatzean kontuan hartuko diren hiri-formak identifikatzeko.

Ondoren, eraikin-arketipo bakoitza gehien kontzentratzen den auzoak analizatzen dira, arketipoarekin lotutako auzo horietako hiri-forma nagusia ebaluatuz. GeoBilbao [121] tresna erabiliz, auzo edo hiri-eremu bakoitzaren adin-mapak eraikitzen dira, non eraikin bakoitzari dagokion eraikuntza-aldia identifikatzen den. Bizkaiko katastroarekin, eraikinen solairu kopurua ebaluatzen da. Eraikitako 27 adin-mapen bi adibide II.7. Irudian azaltzen dira, kasu honetan San Ignazio eta Errekalde auzoei dagozkienak.



II.7. Irudia: San Ignazio eta Errekalde auzoen adin-mapak.

#### II.2.2.2.1. Kotsideratutako hiri-morfologia motak

Aurkeztutako bost hiri-morfologietatik abiatuz, Bilboren kasuan egiazta daiteke 2., 3. eta 4. hiri-forma moduan definitutakoak oso antzekoak direla eraikinen formari eta jarraitutasunari dagokienez. Azterketa honek ez du kanpoko itzalen ebaluazioan sakontzen, ezta tokiko aire-fluxuaren ereduaren azterketan ere; beraz, barne-patioa duten bloke itxia zein irekia bloke linealari hurbil dakieke.

Horren arabera, lan honetan kontsideratutako 3 hiri-morfologia nagusiak II.18. Taulan erakusten dira. Bakoitzari jarraitutasun-indize bat esleitu zaio, hiri-forma horretan kokatuko litzatekeen eraikin batek inguruko eraikinekin kontaktuan izango lukeen alde kopurua adierazten duena. Bloke solidoen barruan egon daitezkeen patio txikiak ez dira kontutan hartzen.

**II.18. Taula: analisisan kontsideratutako 3 hiri-morfologiak.**

|   | Hiri-morfologia mota | Esleitutako jarraitutasun-indizea  |
|---|----------------------|--|
| 1 | Bloke solidoa        | Inguratzaile termikoaren 4 aldeetatik 3 kontaktuan beste eraikin batzuekin |
| 2 | Bloke lineala        | Inguratzaile termikoaren 4 aldeetatik 2 kontaktuan beste eraikin batzuekin |
| 3 | Eraikin bereizia     | Ez dago inguratzailearen zatirik beste eraikin batzuekin kontaktuan        |

*II.2.2.2.2. Eraikinen Azterketa Teknikoen analisia*

Fatxadari buruzko informazioaz gain, EATen txostenek eraikin bat kokatzen den hiri-morfologiari buruzko informazioa ere ematen dute. Beraz, EATen erregistro publikoa [116] informazio-iturri interesgarria izan daiteke ere puntu honetan.

EAT ebaluazio-txostenak bost “eraikuntza-tipologia” bereizten ditu: hiri-bloke baten barruan (“en manzana”), bloke baten barruan (“en bloque”), eraikin berezian (“exenta”), mehelinen artean (“entre medianeras”) eta izkinan (“en esquina”).

Oro har, lehenengo hiru eraikuntza-tipologiak ebaluazio honetan definitutako bloke solidoko, bloke linealeko eta eraikin bereiziko hiri-morfologiei dagozkie, hurrenez hurren. Baina EATen sailkapena dela eta, baliteke eraikin batek tipologia bat baino gehiago betetzea. Adibidez, “hiri-bloke baten barruan” dagoen eraikin bakoitza ere “mehelinen artean” egon daiteke. Izan ere, EATko ohar batzuek tipologia bat baino gehiago adierazten dituzte aldi berean.

Hala ere, salbuespen bat dira, EATko ohar gehienek eraikuntza-tipologia bakarra adierazten baitute. Beraz, “mehelinen artean” edo “izkinan” moduan deskribatzen diren eraikinak, izan daiteke “hiri-bloke baten barruan” edota “bloke baten barruan” kokatzea. Ezin da jakin berariazko eraikina bilatu gabe.

Gainera, lan honetan egindako hiri-formen sailkapena kontuan hartuta, definitutako bloke solidoa ez dator guztiz bat EATen “hiri-bloke baten barruan” tipologiarekin. Egia esan, azken tipologia hori kanpo-fatxadek osatzen duten hiri-ehunean enfokatuta dago eta, beraz, barne-patioa duten bloke irekiak zein itxiak hartzen ditu barne. Azken hauek, ordea, lan honetan bloke linealtzat hartzen dira.

Hau guztia dela eta, azkenenean baztertu egiten da EATen txostenak erabiltzea eraikinen hiri-morfologiari buruzko informazio estatistikoa lortzeko.

Laburbilduz, eraikinen modelizazio energetikorako datu-iturri garrantzitsua bihur liteke EATen erregistro publikoa. Fatxadako eraikuntza-datuez gain, eraikinen hiri-formak sailkatzen lagun lezake. Zentzu honetan, oso interesgarria dirudi, estatistika-xedeetarako, EATak bereizten duen “izkina-eraikinaren” tipologia. Hala ere, hau posible izateko arreta handiagoa jarri beharko litzaioke zenbait xehetasuni, hala nola eraikuntza-tipologiaren adierazpenari, EAT burutzean ahalegin handiagorik suposatu gabe.



### II.2.2.2.3. Forma eta jarraitutasunaren esleipena

Zortzi hiri-barruti daude Bilbon, II.19. Taulan laburbiltzen direnak.

II.19. Taula: Bilboko hiri-barrutiak eta auzoak.

|   | Hiri-barrutia           | Hiri-barrutia osatzen duten auzoak   |
|---|-------------------------|--|
| 1 | Deustu                  | Arangoiti, Ibarrekolanda, San Ignazio-Elorrieta eta Deustu   |
| 2 | Uribarri                | Gazteleku, Matiko-Lorategi hiria, Uribarri eta Zurbaran-Arabella   |
| 3 | Otxarkoaga – Txurdinaga | Otxarkoaga eta Txurdinaga  |
| 4 | Begoña                  | Begoña, Bolueta eta Santutxu   |
| 5 | Ibaiondo                | Atxuri, Bilbo Zaharra, Zazpikaleak, Iturralde, La Peña, Miribilla, Adrian Deuna, San Frantzisko, Buia, Solokoetxe eta Zabala |
| 6 | Abando                  | Abando eta Indautxu  |
| 7 | Errekalde               | Ametzola, Iralabarri, Iturrigorri-Peñaskal, Errekaldeberri-Larraskitu eta Uretamendi   |
| 8 | Basurtu – Zorrotza      | Altamira, Basurtu, Olabeaga, Masustegi-Mintegitueta eta Zorrotza   |

Hiriko barrutien banaketa espaziala II.8. Irudian erakusten da.



II.8. Irudia: Bilboko hiri-barrutien banaketa espaziala.

Eraikin-arketipoak osatzen dituzten etxebizitza adierazgarrien hiri-barrutiaren arabera banaketa espaziala II.20. Taulan erakusten da [50]. Koloreztatutako zeldek etxebizitza adierazgarri bakoitza kontzentratzen den hiri-barrutiak erakusten dituzte. Hauen hiri-morfologia da xehetasunez aztertu dena. Azken zutabeak analisi sakonago honetan sartutako etxebizitza adierazgarrien zatia adierazten du.

**II.20. Taula: etxebizitza adierazgarrien banaketa espaziala, hiri-barrutiaren arabera.**

| Etxebizitza adierazgarria | Hiri-barrutiak |          |                       |        |          |        |           |                  | Aztertutako guztizko etxebizitzen zatia |
|---------------------------|----------------|----------|-----------------------|--------|----------|--------|-----------|------------------|---|
|                           | Deustu         | Uribarri | Otxarkoaga Txurdinaga | Begoña | Ibaiondo | Abando | Errekalde | Basurtu Zorrotza |   |
| EA 1                      | %11,90         | %16,29   |                       | %14,80 | %23,65   |        | %20,91    | %12,45           | %75,65                                  |
| EA 2                      | %33,93         | %9,74    |                       | %6,89  | %29,96   |        | %13,33    | %6,14            | %77,23                                  |
| EA 3                      | %13,96         | %6,76    |                       | %1,80  | %24,55   | %26,35 | %17,45    | %9,12            | %82,32                                  |
| EA 4                      | %5,76          | %4,55    |                       | %2,07  | %21,63   | %40,27 | %13,85    | %11,87           | %87,62                                  |
| EA 5                      |                |          |                       |        | %9,45    | %90,55 |           |                  | %90,55                                  |
| EA 6                      |                |          |                       |        | %7,37    | %92,63 |           |                  | %92,63                                  |
| EA 7                      | %9,98          | %24,94   | %25,02                | %14,80 | %4,42    |        | %17,99    | %2,86            | %82,75                                  |
| EA 8                      | %21,66         | %30,23   | %1,96                 | %12,21 | %6,32    |        | %20,13    | %7,49            | %84,23                                  |
| EA 9                      | %10,21         | %10,38   | %14,91                | %19,69 | %17,55   | %4,70  | %15,24    | %7,33            | %67,38                                  |
| EA 10                     | %16,46         | %8,71    | %1,36                 | %27,27 | %14,66   | %5,18  | %14,33    | %12,02           | %72,73                                  |
| EA 11                     | %25,35         | %10,38   |                       | %17,96 | %2,99    | %25,95 | %2,79     | %14,57           | %83,83                                  |
| EA 12                     | %13,29         | %9,93    | %14,90                | %47,11 | %5,37    | %3,49  | %3,22     | %2,68            | %75,30                                  |
| EA 13                     | %20,42%        | %14,66   | %10,49                | %23,47 | %12,54   | %2,88  | %9,53     | %6,01            | %71,09                                  |
| EA 14                     | %17,12         | %20,02   | %16,58                | %7,10  | %6,57    | %10,87 | %16,36    | %5,38            | %70,08                                  |
| EA 15                     | %7,79          |          | %47,21                | %4,88  | %17,33   |        | %3,84     | %18,95           | %83,49                                  |
| EA 16                     | %16,08         | %2,59    | %4,77                 | %6,95  | %32,78   | %4,05  | %16,29    | %16,49           | %81,64                                  |
| EA 17                     | %4,91          |          | %31,01                | %4,65  | %24,81   |        | %28,94    | %5,68            | %84,75                                  |

Eraikin-arketipo bakoitzerako identifikatutako hiri-barruti nagusietan arreta jarritz (kolorezko zeldak), arketiporekin lotutako hiri-formaren tipologia aztertzen da. Arketipo-barruti multzo bakoitza banan-banan ebaluatzen da, eraikin-arketipoaren kokapen nagusiak identifikatuz eta horiekin lotutako hiri-morfologia ebaluatuz. Kasu gutxi batzuetan, ez da hiri-forma argirik egiaztatu. II.21. Taulan arketipo bakoitzaren ebaluazioaren emaitzak jaso dira.

II.21. Taula: eraikin-arketipo bakoitzaren hiri-morfologiaren ebaluazioa.

| Eraikin-arketipoa | Eraikitze-aldia | Ezaugarriak                            | Hiri-barrutia | Eraikin tipologiarekiko zatia (%) | Eraikinen kokapena  | Hiri-forma nagusia  |
|-------------------|-----------------|--|---------------|-----------------------------------|---|---|
| 1. Ark            | < 1960          | 4 - 6 solairu & < 60 m <sup>2</sup>    | Ibaiondo      | %23,65                            | Gehiengoa Zazpikaleetan eta Bilbo Zaharran kontzentratzen dira, non ia eraikin guztiak 1960a baino lehen eraiki ziren, bloke solidoak osatuz.<br><br>Abusun, Miribillan and Adrian Deunan eraikinak 1960tik aurrera eraiki ziren. | Bloke solidoa   |
|                   |                 |  | Errekalde     | %20,91                            | Errekaldeko erdialdean (Gordonizen mendebaldean: Camilo Villabaso, etab.), Artazubekoan (Eskurtze parkearen inguruak) eta Iralabarrin (Kirikiño, Irala, Torre Urizar, etab.) kokatuak.  | Bloke lineala   |
|                   |                 |  | Uribarri      | %16,29                            | Hiri-morfologia nagusirik gabe.<br><br>Bloke solidoak eta bloke linealak daude Uribarriren beheko partean (Gazteleku, Huertas de la Villa...) zein goiko partean (Matiko, Uribarri, Trauko...).                                   | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak |
|                   |                 |  | Begoña        | %14,80                            | Basarrate zelaiaren goikaldean Almería, Alicante, Albacete, etab., kaleak) eta Parroco Unceta gunean kontzentratuta.  | Bloke lineala   |
| 2. Ark            | < 1960          | 4 - 6 solairu & 60 - 90 m <sup>2</sup> | Deustu        | %33,93                            | Batez ere San Ignazio kokatuak, Lehendakari Aguirre zumarkalearen iparraldean.<br><br>Deustun ere, Madariaga eta Blas de Otero gunean.  | Bloke lineala   |
|                   |                 |  | Ibaiondo      | %29,96                            | Gehiengoa Zazpikaleetan eta Bilbo Zaharran kontzentratzen dira, non ia eraikin guztiak 1960a baino lehen eraiki ziren, bloke solidoak osatuz.<br><br>Abusun, Miribillan and Adrian Deunan eraikinak 1960tik aurrera eraiki ziren. | Bloke solidoa   |
|                   |                 |  | Errekalde     | %13,33                            | Errekaldeko erdialdean (Gordonizen mendebaldean: Camilo Villabaso, etab.), Artazubekoan (Eskurtze parkearen inguruak) eta Iralabarrin (Kirikiño, Irala, Torre Urizar, etab.) kokatuak.  | Bloke lineala   |
| 3. Ark            | < 1960          | 7 - 9 solairu & < 60 m <sup>2</sup>    | Abando        | %26,35                            | Zabalgunean eta Indautxun, bietan da bloke solidoa nagusi.  | Bloke solidoa   |
|                   |                 |  | Ibaiondo      | %24,55                            | Gehiengoa Zazpikaleetan eta Bilbo Zaharran kontzentratzen dira, non ia eraikin guztiak 1960a baino lehen eraiki ziren, bloke solidoak osatuz.<br><br>Abusun, Miribillan and Adrian Deunan eraikinak 1960tik aurrera eraiki ziren. | Bloke solidoa   |



|        |             |   |                                |        |  |   |
|--------|-------------|---|--------------------------------|--------|--|---|
|        |             |   | <b>Errekalde</b>               | %17,45 | Badaude bloke linealeko eraikin batzuk Gordonizeko goikaldean (Errekaldeberrin) eta Iralabarrin.<br><br>Baina eraikinen gehiengoa Autonomia kalea eta Ametzola parkearen artean kokatzen dira, Labayru, Zugastinovia eta Errekaldeko Zumarkalearen eremuetan. Gune horiek Abando auzoarekin mugakideak dira eta bloke solidoa da nagusi. | Bloke solidoa   |
|        |             |   | <b>Deustu</b>                  | %13,96 | Deustu auzoan zehar banatuak, hiri-morfologia argirik gabe.  | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak |
| 4. Ark | < 1960      | 7 - 9 solairu & 60 - 90 m <sup>2</sup>  | <b>Abando</b>                  | %40,27 | Zabalgunean eta Indautxun, bietan da bloke solidoa nagusi.   | Bloke solidoa   |
|        |             |   | <b>Ibaiondo</b>                | %21,63 | Gehiengoa Zazpikaleetan eta Bilbo Zaharran kontzentratzen dira, non ia eraikin guztiak 1960a baino lehen eraiki ziren, bloke solidoak osatuz. Abusun, Miribillan and Adrian Deunan eraikinak 1960tik aurrera eraiki ziren.   | Bloke solidoa   |
|        |             |   | <b>Errekalde</b>               | %13,85 | Badaude bloke linealeko eraikin batzuk Gordonizeko goikaldean (Errekaldeberrin) eta Iralabarrin.<br><br>Baina eraikinen gehiengoa Autonomia kalea eta Ametzola parkearen artean kokatzen dira, Labayru, Zugastinovia eta Errekaldeko Zumarkalearen eremuetan. Gune horiek Abando auzoarekin mugakideak dira eta bloke solidoa da nagusi. | Bloke solidoa   |
|        |             |   | <b>Basurtu - Zorrotza</b>      | %11,87 | Aita Donostia plazaren ingurunean eta Sabino Arana eta Luis Briñas kaleen artean kontzentratuta. Zorrotzako bloke linealak solairu gutxiagokoak dira (3-4 normalean).  | Bloke solidoa   |
| 5. Ark | < 1960      | 7 - 9 solairu & 90 - 120 m <sup>2</sup> | <b>Abando</b>                  | %90,55 | Zabalgunean eta Indautxun, bietan da bloke solidoa nagusi.   | Bloke solidoa   |
| 6. Ark | < 1960      | 7 - 9 solairu & > 120 m <sup>2</sup>    | <b>Abando</b>                  | %92,63 | Zabalgunean eta Indautxun, bietan da bloke solidoa nagusi.   | Bloke solidoa   |
| 7. Ark | 1960 - 1980 | 4 - 6 solairu & < 60 m <sup>2</sup>     | <b>Otxarkoaga - Txurdinaga</b> | %25,02 | Otxarkoaga auzoaren gehiengoa mota honetako eraikinez osatuta dago, beti bloke linealak osatuz.  | Bloke lineala   |
|        |             |   | <b>Uribarri</b>                | %24,94 | Batez ere Zumalakarregi Etorbidearen iparraldean, ze Campo Volantinen eta Gaztelekun 7-9 solairuko eraikinak direlako nagusi.<br><br>Bloke lineala da nagusi, Begoñako Andramari, Zurbaranbarri, Sarrikue, Arabella, Zumaia etab. taldeetan ohikoa.  | Bloke lineala   |



|               |                    |  |                  |        |  |   |
|---------------|--------------------|--|------------------|--------|--|---|
|               |                    |  | <b>Errekalde</b> | %17,99 | Bloke lineala da nagusi.<br>Errekaldeberrin, batez ere Uretamendi eta Bizkargi/Filomena Baldezate guneeetan.<br>Iralabarrin, batez ere Irala eta Kirikiño kaleen goikaldean kokatuta.  | Bloke lineala   |
|               |                    |  | <b>Begoña</b>    | %14,08 | Hiri-morfologia nagusirik gabe.<br>Badaude bloke solido batzuk Basarrate zelaiaren ingurunean.<br>Baina badaude ere bloke linealak auzoan zehar sakabanatuta.  | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak |
| <b>8. Ark</b> | <b>1960 - 1980</b> | <b>4 - 6 solairu &amp; 60 - 90 m<sup>2</sup></b> | <b>Uribarri</b>  | %30,23 | Batez ere Zumalakarregi Etorbidearen iparraldean, ze Campo Volantinen eta Gaztelekun 7-9 solairuko eraikinak direlako nagusi.<br><br>Bloke lineala da nagusi, Begoñako Andramari, Zurbaranbarri, Sarrikue, Arabella, Zumaia etab. taldeetan ohikoa.  | Bloke lineala   |
|               |                    |  | <b>Deustu</b>    | %21,66 | Batez ere San Ignazio kokatuak, Lehendakari Aguirre Etorbidearen eta Nerbioi ibaiaren arteko eremuan.  | Bloke lineala   |
|               |                    |  | <b>Errekalde</b> | %20,13 | Bloke lineala da nagusi.<br>Errekaldeberrin, batez ere Uretamendi eta Bizkargi/Filomena Baldezate guneeetan.<br>Iralabarrin, batez ere Irala eta Kirikiño kaleen goikaldean kokatuta.  | Bloke lineala   |
|               |                    |  | <b>Begoña</b>    | %12,21 | Hiri-morfologia nagusirik gabe.<br>Badaude bloke solido batzuk Basarrate zelaiaren ingurunean.<br>Baina badaude ere bloke linealak auzoan zehar sakabanatuta.  | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak |
| <b>9. Ark</b> | <b>1960 - 1980</b> | <b>7 - 9 solairu &amp; &lt; 60 m<sup>2</sup></b> | <b>Begoña</b>    | %19,69 | Batez ere ipar-mendebaldeko eremuan, Solokoetxe eta Zazpikaleekin gunen mugakideetan: Fika kalearen goikaldean, Marcelino Menendez Pelayo, Remigio Gandasegui, Caserío Landaburu eta Juan de Gardeazabal eremuak, etab.<br><br>Baita ipar-ekialdean ere, Iturriagaren goikaldean eta Luis Echevarría eremua. | Bloke lineala   |
|               |                    |  | <b>Ibaiondo</b>  | %17,55 | Abusun kontzentratuta, Zamakona kalea.   | Bloke lineala   |



|                |                    |   |                                |        |   |   |
|----------------|--------------------|---|--------------------------------|--------|---|---|
|                |                    |   | <b>Errekalde</b>               | %15,24 | Hiri-morfologia nagusirik gabe.<br><br>Badaude bloke solidoak Autonomia kalea eta Ametzola parkearen arteko eremuan eta Zabalburun (Lapurdi, Pablo Picasso, etab.)<br><br>Errekaldeberrin bloke lineala da nagusi, auzoaren erdialdean kokatuta.  | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak |
|                |                    |   | <b>Otxarkoaga - Txurdinaga</b> | %14,91 | Otxarkoaga auzoan kontzentratuta, non eraikin mota hau 4-6 solairukoak baino ezohikoagoa da.  | Bloke lineala   |
| <b>10. Ark</b> | <b>1960 - 1980</b> | <b>7 - 9 solairu &amp; 60 - 90 m<sup>2</sup></b>  | <b>Begoña</b>                  | %27,27 | Batez ere ipar-mendebaldeko eremuan, Solokoetxe eta Zazpikaleekin gunen mugakideetan: Fika kalearen goikaldean, Marcelino Menendez Pelayo, Remigio Gandasegui, Caserío Landaburu eta Juan de Gardezabal eremuak, etab.<br><br>Baita ipar-ekialdean ere, Iturriagaren goikaldean eta Luis Echevarría eremua. | Bloke lineala   |
|                |                    |   | <b>Deustu</b>                  | %16,46 | Hiri-morfologia nagusirik gabe.<br><br>San ignazioz bloke linealak dira nagusi, baina Deustun bloke solidoak eta linealak daude.  | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak |
|                |                    |   | <b>Ibaiondo</b>                | %14,66 | Abusun kontzentratuta, Zamakona kalea.  | Bloke lineala   |
|                |                    |   | <b>Errekalde</b>               | %14,33 | Hiri-morfologia nagusirik gabe.<br><br>Badaude bloke solidoak Autonomia kalea eta Ametzola parkearen arteko eremuan eta Zabalburun (Lapurdi, Pablo Picasso, etab.)<br><br>Errekaldeberrin bloke lineala da nagusi, auzoaren erdialdean kokatuta.  | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak |
| <b>11. Ark</b> | <b>1960 - 1980</b> | <b>7 - 9 solairu &amp; 90 - 120 m<sup>2</sup></b> | <b>Abando</b>                  | %25,95 | Zabalgunean eta Indautxun, bietan da bloke solidoa nagusi.  | Bloke solidoa   |
|                |                    |   | <b>Deustu</b>                  | %25,35 | Hiri-morfologia nagusirik gabe.<br><br>San ignazioz bloke linealak dira nagusi, baina Deustun bloke solidoak eta linealak daude.  | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak |
|                |                    |   | <b>Begoña</b>                  | %17,96 | Batez ere ipar-mendebaldeko eremuan, Solokoetxe eta Zazpikaleekin gunen mugakideetan: Fika kalearen goikaldean, Marcelino Menendez Pelayo, Remigio Gandasegui, Caserío Landaburu eta Juan de Gardezabal eremuak, etab.<br><br>Baita ipar-ekialdean ere, Iturriagaren goikaldean eta Luis Echevarría eremua. | Bloke lineala   |



|         |             |  |                                |        |  |   |
|---------|-------------|--|--------------------------------|--------|--|---|
|         |             |  | <b>Basurtu - Zorrotza</b>      | %14,57 | Hiri-morfologia nagusirik gabe.<br>Zorrotzan bloke lineala ohikoagoa da, baina Ferrocarril eta Luis Briñasen arteko gunean bloke solidoa da nagusi.                              | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak   |
| 12. Ark | 1960 - 1980 | > 10 solairu & < 60 m <sup>2</sup>     | <b>Begoña</b>                  | %47,11 | Batez ere Santutxuren hego-ekialdean, Boluetarekin eta Europa parkearekin gune-mugakideetan (Sagarminaga, Iturriaga, Azurleku, etab.)  | Bloke lineala   |
|         |             |  | <b>Otxarkoaga - Txurdinaga</b> | %14,90 | Batez ere eraikin bereziak, Otxarkoagan eta Txurdinagako iparraldean nagusi direnak.<br>Halere, Txurdinagan badaude ere bloke linealak, Europa parkearen iparraldean.            | Eraikin berezia   |
|         |             |  | <b>Deustu</b>                  | %13,29 | Batez ere Elorrietan (iparraldean) eta Sarrikon.   | Bloke lineala   |
| 13. Ark | 1960 - 1980 | > 10 solairu & 60 - 90 m <sup>2</sup>  | <b>Begoña</b>                  | %23,47 | Batez ere Santutxuren hego-ekialdean, Boluetarekin eta Europa parkearekin gune-mugakideetan (Sagarminaga, Iturriaga, Azurleku, etab.)  | Bloke lineala   |
|         |             |  | <b>Deustu</b>                  | %20,42 | Batez ere Elorrietan (iparraldean) eta Sarrikon.   | Bloke lineala   |
|         |             |  | <b>Uribarri</b>                | %14,66 | Hiri-morfologia nagusirik gabe.<br>Zumalakarregi Etorbidearen iparraldean bloke linealak daude, eta baita eraikin bereziak ere.  | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke linealak eta eraikin bereziak |
|         |             |  | <b>Ibaiondo</b>                | %12,54 | Abusun kontzentratuta, Zamakona kalea.   | Bloke lineala   |
| 14. Ark | 1960 - 1980 | > 10 solairu & 90 - 120 m <sup>2</sup> | <b>Uribarri</b>                | %20,02 | Hiri-morfologia nagusirik gabe.<br>Zumalakarregi Etorbidearen iparraldean bloke linealak daude, eta baita eraikin bereziak ere.  | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke linealak eta eraikin bereziak |
|         |             |  | <b>Deustu</b>                  | %17,12 | Batez ere Elorrietan (iparraldean) eta Sarrikon.   | Bloke lineala   |
|         |             |  | <b>Otxarkoaga - Txurdinaga</b> | %16,58 | Batez ere eraikin bereziak, Otxarkoagan eta Txurdinagako iparraldean (Garaizar) nagusi direnak.<br>Halere, Txurdinagan badaude ere bloke linealak, Europa parkearen iparraldean. | Eraikin berezia   |



|         |             |  |                                |        |   |   |
|---------|-------------|--|--------------------------------|--------|---|---|
|         |             |  | <b>Errekalde</b>               | %16,36 | Ametzola parkearen eta Autonomia kalearen artean kontzentratuta, eta baita Casillan ere.<br><br>Hiri-morfologia nagusirik gabe. Badaude bloke lineal batzuk (Avila, Pintores Zubiaurre, Olite, etab.) eta baita bloke solidoak ere (Felix Landin, Jose Olabarria, Errekaldeko Zumarkalea...).                 | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak |
| 15. Ark | 1981 - 2005 | 4 - 6 solairu & 60 – 90 m <sup>2</sup> | <b>Otxarkoaga - Txurdinaga</b> | %47,21 | Europa parkearen inguruan, Julian Gaiarre and Arbidea gunekak.  | Bloke lineala   |
|         |             |  | <b>Basurtu - Zorrotza</b>      | %18,95 | Zorrotzabason kontzentratuta (Zorrotza auzoan).   | Bloke lineala   |
|         |             |  | <b>Ibaiondo</b>                | %17,33 | Adrian Deunaren goikaldean bloke linealak daude: Los Mimbres, Monte Eretza, etab.<br><br>Bilbo Zaharran (San Frantzisko, Cortes, Bailen, Hernani...) eta Zazpikaleetan, bloke solidoetan zeuden eraikinak ordezkatzen dituzte.  | Hiri-morfologia nagusirik gabe: bloke solidoak eta bloke linealak |
| 16. Ark | 1981 - 2005 | 7 - 9 solairu & 60 – 90 m <sup>2</sup> | <b>Ibaiondo</b>                | %32,78 | Adrian Deunan batez ere (Bilboko sarbidean).<br><br>Miribilla eta Bilbo Zaharraren artean ere: Saralegi plaza, Andrés Eliseo de Mañarikua, Olano, Mina San Luis, etab.  | Bloke lineala   |
|         |             |  | <b>Basurtu - Zorrotza</b>      | %16,79 | Basurturen goikaldean, Masustegi eta Basurtu - Kastrexana kaleen artean (Auntxeneta, Lezeaga), Bentazarran, etab. Bloke lineala da nagusi.<br><br>Halere, badaude eraikin batzuk bloke solidoetan, Novia Salcedo and Pintor Lecuona eremuan.  | Bloke lineala   |
|         |             |  | <b>Errekalde</b>               | %16,29 | Errekaldeko iparraldean.<br><br>Ametzola parkearen inguruan: Uribe Laso M <sup>a</sup> Victoria, Jaen, Ugalde, etab., bloke linealak osatuz.<br><br>Basurturekin mugakideak diren guneeetan: Biarritz, Doctor Dias Emparanza, Alfreko Kraus, etab. Bloke lineala da nagusi, bloke solido batzuk dauden arren. | Bloke lineala   |





|         |             |                                       |                                |        |   |                 |
|---------|-------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------|---|-----------------|
|         |             |                                       | <b>Deustu</b>                  | %16,08 | San Ignazioren beheko aldean, Nerbioi ibaiaren alboan: Islas Canarias, Aragon, Asturias, etab.<br><br>Baita ere Botikazarrean/Deustuko zubiaren eremuan, eta Deustu eta Sarriko artean.               | Bloke solidoa   |
| 17. Ark | 1981 - 2005 | > 10 solairu & 60 – 90 m <sup>2</sup> | <b>Otxarkoaga - Txurdinaga</b> | %31,01 | Europa parkaren inguruan eta iparraldean.   | Eraikin berezia |
|         |             |                                       | <b>Errekalde</b>               | %28,94 | Ametzola parkearen dorreak eraikin bereziak dira.<br><br>Baina Ametzola parkearen goialdean, bloke linealak dira nagusi: Antonio de Trueba, Eskurtze, Uribe Laso M <sup>a</sup> Victoria, Jaen, etab. | Bloke lineala   |
|         |             |                                       | <b>Ibaiondo</b>                | %24,81 | Miribillan, Jardines de Gernika inguruan.   | Bloke lineala   |

II.21. Taulak erakusten du Bilbon erlazio argia dagoela eremu bateko hiri-morfologia nagusiaren eta haren topografiaren artean. Hala, Bilbo erdiko bailararen eta Nerbioi ibaiaren inguruko lur lauek bloke solidoa erakusten dute, XIX. mendeko zabalguneen motakoa. Hau da Zazpikaleetako, Uribarriko behe parteko (Campo Volantin) Deustu, Abando – Indautxu eta azken honen bazterreko Errekalde eta Basurtuko eremuen kasua. Aldiz, periferiako maldetan bloke lineala da nagusi, Otxarkoaga, Txurdinaga, Uribarri (Zurbaran) eta Irala bezalako lekuen topografia zailari hobeto egokitzen zaiona.

Era berean, eraikitze-aldiaren eta hiri-bloke moten arteko erlazioa ikusten da. Hiriaren garapen historikoa dela eta, zeinaren demografia eta eraikuntza *boom*-a estilo arrazionalista nagusi zen garaian eman zen, 1960ko hamarkadatik aurrera sortutako auzo periferikoetan bloke lineala da nagusi.

Hala ere, eraikin-arketipo eta hiri-barruti multzo desberdinen hiri-formaren emaitzetatik abiatuta, beharrezkoa da hiri-forma tipologia bakarra esleitzea arketipo bakoitzari, hiri osoko eskalan adierazgarri litzatekeena.

Eraikin-arketipoen kasu gehienetan, hiri-barruti ezberdinen hiri-forma nagusia berdina da eta, beraz, emaitza zuzena da. Antzeko adierazgarritasuna duten hiri-forma bat baino gehiago dauden kasuetan (gehienez bi hiri-formako kasuak daude), II.22. Taulak modelatutako hiri-formen hautaketa justifikatzen du.

II.22. Taula: modelatutako hiri-formen hautaketa.

| Eraikin-arketipoa | Eraikuntza-aldia | Solairu kopurua        | Etxebizitzaren azalera | Bilboko bizitegi-parkearekiko zatia | Eslelitutako hiri-forma | Azalpena, aplikagarria denean   |   |
|-------------------|------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---|---|
| n. 1              | < 1960           | 4 - 6 solairu          | < 60 m <sup>2</sup>    | %5,85                               | Bloke lineala           | Zazpikaleen eraikin ohikoez aparte, bloke solidoak osatzen dituztenak, bloke linealak nagusi dira hiri-mailan. Torre Urizar, Torre Madariaga eta Parroco Unceta eraikin-arketipo honi dagozkion adibide batzuk dira.                              |   |
| n. 2              |                  |                        | 60 - 90 m <sup>2</sup> | %6,37                               | Bloke lineala           | Zazpikaleen eraikin ohikoez aparte, bloke solidoak osatzen dituztenak, bloke linealak nagusi dira hiri-mailan. San Ignazioaren kasua litzateke hau, zeinen eraikuntzaren garrantzia azpimarratu den Bilboko garapen-historikoaren deskribapenean. |   |
| n. 3              |                  | 7 - 9 solairu          | < 60 m <sup>2</sup>    | %3,72                               | Bloke solidoa           |   |   |
| n. 4              |                  |                        | 60 - 90 m <sup>2</sup> | %8,38                               | Bloke solidoa           |   |   |
| n. 5              |                  |                        | 90- 120 m <sup>2</sup> | %3,42                               | Bloke solidoa           |   |   |
| n. 6              |                  |                        | > 120 m <sup>2</sup>   | %2,40                               | Bloke solidoa           |   |   |
| n. 7              | 1960 - 1980      | 4 - 6 solairu          | < 60 m <sup>2</sup>    | %4,79                               | Bloke lineala           |   |   |
| n. 8              |                  |                        | 60 - 90 m <sup>2</sup> | %5,56                               | Bloke lineala           |   |   |
| n. 9              |                  | 7 - 9 solairu          | < 60 m <sup>2</sup>    | %5,10                               | Bloke lineala           |   |   |
| n. 10             |                  |                        | 60 - 90 m <sup>2</sup> | %12,93                              | Bloke lineala           |   |   |
| n. 11             |                  |                        | 90- 120 m <sup>2</sup> | %2,82                               | Bloke solidoa           | Aztertutako eraikinen gehiengoa bloke solidoetan kokatzen da. Abandoren kasuan adibidez, non etxebizitzaren azalera handia, 7-9 solairuko eraikinetan, oso bereizgarria den.  |   |
| n. 12             |                  |                        | > 10 solairu           | < 60 m <sup>2</sup>                 | %2,90                   | Bloke lineala   |   |
| n. 13             |                  | 60 - 90 m <sup>2</sup> |                        | 9,13                                | Bloke lineala           |   |   |
| n. 14             |                  |                        |                        | 90- 120 m <sup>2</sup>              | %3,59                   | Eraikin berezia   | Egiatan, Elorrietako (San Ignazio) eta Zumalakarregiren iparraldeko (Uribarri) bloke linealen forma dela eta, inguruko eraikinekin kontaktuan zati txikia dute. Beraz, jarraitutasunari dagokionez eraikin berezi moduan kontsidera daitezke. |
| n. 15             |                  | 1981 - 2005            | 4 - 6 solairu          | 60 - 90 m <sup>2</sup>              | %3,99                   | Bloke lineala   |   |
| n. 16             |                  |                        | 7 - 9 solairu          | 60 - 90 m <sup>2</sup>              | %4,93                   | Bloke lineala   |   |
| n. 17             | > 10 solairu     |                        | 60 - 90 m <sup>2</sup> | %2,01                               | Bloke lineala           | Txurdinaga eta Ametzola parkeko dorreak aldiaren paradigmatico kontsidera daitezkeen arren, egiatan Ametzola parkearen iparraldean eta Miribillan bloke lineala da nagusi.  |   |

Bestalde, eraikin-arketipoen formari dagokionez, diseinu angeluzuzenak kontsideratu dira. Eraikin-arketipo bakoitzari tipologia horretako eraikinen formarik ohikoena esleitu zaio, beti ere hurrengo bi kontsiderazioekin:

- Diseinu angeluzuzenen modelizazioak analititik kanpo uzten du X Taldeak sustatutako aldaera arkitektonikoa, batez ere 70eko hamarkadan erabilia.
- Eraikin-arketipo bakoitzari forma bakarra esleitzeak sinplifikazio gehigarri bat egitera behartzen du bloke solidoetan kokatutako eraikinetan, kasu hauetan eraikinen forma aldakorragoa baita.

Ondorengo deskribapenean, eraikinen diseinu angeluzuzenaren aldeei luzera eta zabalera deritze. Eraikinaren luzera kalera ematen duen fatxada-lerroa litzateke. Eraikinaren zabalera, aldiz, inguruko eraikinekin kontaktuan dauden aldeei dagokie; hau da, mehelinei.

4 – 6 solairu bitarteko bloke linealei dagokionez, antzeko dimentsioak dituzte 1960 baino lehenagoko eta 1960-1980 eraikitze-aldietan. Eraikinaren zabalera, bloke linealetan bi fatxaden arteko tartea dena, 8 – 10 metro bitartekoa izan ohi da. Distantzia horrek, arrazionalismoaren ideal higienikoan oinarrituta, aireztapen gurutzatua ahalbidetzen du etxebizitzetan. Horrelako eraikinak San Ignazion, Deustun (Torre Madariaga), Otxarkoagan, Uribarrin (Arabella, Andramari de Begoña, Zurbaranbarri), Errekalden (Torre Urizar, Uretamendi) edo Begoñan (Parroco Unceta, Luis Echevarría) aurki daitezke. Ikus daitekeenez, eremu horiek batez ere periferian kokatzen dira; izan ere, horrelako eraikin-zabalera estuak historikoki etxebizitza sozialekin egon dira lotuta. Eraikinen luzera, aldiz, aldakorragoa da, eta etxebizitza kopuruaren eta azaleraren araberkoa. Parroco Unceta edo Torre Urizarren 14 – 15 metroetatik, San Ignazioko eraikin gehienek 20 metroetara alda daitezke.

Otxarkoagan, eraikin-dimentsio hauek nagusi dira ere altuera handiagoko eraikinetan. Orokorrean, 7 – 9 solairuko eraikinek 4 – 6 solairuko forma bera dute. Hala ere, hau salbuespena litzateke, 1960 – 1980 aldian eraikitako 7 – 9 solairuko eraikinek oro har diseinu ezberdina baitute.

Azken hauetan, mehelinak eraikin-diseinuen alderik luzeenak dira, kalera ematen duten fatxada-lerroak baino luzeagoak izanik normalean. Bestela esanda, eraikin-luzera eraikin-zabalera baino laburragoa da. 21 – 23 metrotako zabalera izanik, eraikinen diseinua karratuagoa da 10 metrotako zabalera duten eraikinekin konparatuz. Horrelako eraikinak Ibaiondon (Abusu), Errekalden (Camilo Villabaso, Bizkargi, Sollube, Anboto, etab.) Begoñan (Solokoetxe eta Zazpikaleekiko mugetan) edo San Ignazion aurki daitezke, azken honetan 34 metrorainoko eraikin zabalera ere existitzen diren arren.

Bestalde, bloke linealetako 10 solairu baino gehiagoko eraikinek deskribatutako bi diseinuak dituzte. Alde batetik, Santutxun 8 – 10 metrotako eraikin-zabalerak aurki daitezke (Bolueta eta Europa parkearekiko mugetan). Bestetik, fatxada lerroa baino luzeagoak diren mehelinak topa daitezke. Sarrikan, adibidez, 26 metrotako eraikin-zabalerak daude, 7 – 9 solairuko eraikinenak baino handiagoak direnak.

Bloke solidoei dagokionez, XIX. mendeko Zabalguneko eraikinetan 18 metrotako fatxadak dira nagusi [112]. Zazpikaleetan, ordea, fatxada-lerroa 8 – 14 metrotara jaisten da. Honekin lerrotatuta, 1927 eta 1950 artean eraikitako Zabalguneko eraikinek 10 – 20 metro bitarteko

fatxadak dituztela estimatzen da [118], periferian laburragoak izanik. Hala ere, benetan eraikin forma ugari aurki daitezke, baita bloke solido berean ere. Fatxada-luzerak asko aldatzen dira, eremu batean bloke solidoko hiri-forma uniformeak bada ere. Baina patroirik batzuk identifika daitezke.

Zazpikaleetan, fatxada-luzerak laburrak izan ohi dira. Eraikinek 8 metro inguruko luzerak dituzte normalean, 4 metrotako fatxadak dituzten eraikinak ere existitzen diren arren. Moyua – Abando guneko eraikinek, ordea, 16 – 24 metrotako fatxada-lerroak dituzte. Laburragoak izan daitezkeen salbuespenek gutxienez 10 metrotako luzerak erakusten dituzte. Indautxun, eta baita horri mugakide diren Errekaldeko eta Basurtuko eremuetan, fatxadek bitarteko luzerak dituzte (14 – 20 metro), Moyua – Abandokoak baino laburragoak izanik.

Bilboko hiri-morfologiaren orientazioarekin dagokionez, konproba daiteke orokorrean ez duela ipar – hego edo ekialde – mendebalde patroirik osatzen. Hiriaren erdiguneko bloke solidoa ipar – ekialdera (edota, gauza bera dena, hego – mendebaldera) orientatuta dago. Antzekoa gertatzen da Zazpikaleetan, baina honetan patroia kaotikoa da.

Periferiako bloke linealen orientazioa, ordea, topografiara egokitzeak baldintzatzen du. Hala ere, ez dago apenas hegoalderantz orientatutako auzorik. Oro har, orientazioa hego – ekialderantzkoa da, Zurbaranbarrin, San Ignazio, Adrian Deunan edo Miribillan bezala, edo hego – mendebalderantzkoa, Otxarkoagan, Txurdinagan, Santutxun or Errekalden bezala.

Aipatu denaren salbuespena Deustu auzoa litzateke, hegoaldera begira dagoen Bilboko hiri-morfologia bakarra izanik. Beraz, modelatutako eraikin-arketipoen orientazioa ezartzerakoan, hurrengo gogoetak egin dira:

- Bloke solido uniformeko hiri-morfologietan, euren izaera dela eta, fatxada lau noranzko perpendikularretako bakoitzari begira duen eraikin kopurua antzekoa izango da. Eraikin bakoitzaren berokuntza-eskaria, aldiz, honek jasotako eguzki-irradiazioaren arabera zertxobait alda daiteke (hegoaldera orientatutako eraikinek berokuntza-eskari txikiagoa izango dute iparraldera begira daudenak baino). Beraz, bloke solidoekin lotuta dauden eraikin-arketipoak mendebalderantz orientatzea erabaki da, bloke solidoa osatzen duten eraikin guztien batzbestekotzat.
- Bloke linealetan kokatutako eraikin-arketipoen fatxadak hego – mendebalderantz orientatu dira, lehenago deskribatu diren patroiekin bat datorrena. Hala ere, aipatu beharra dago emaitzak ia berdinak liratekeela hego – ekialderantz orientatu izan balitz.
- Eraikin berezia den arketipoa lau puntu kardinalen arabera orientatu da.

II.23. Taulak eraikin-arketipo eredu bakoitzaren diseinu-dimentsioak eta orientazioa laburbiltzen du. 20 m<sup>2</sup>-ko eskailerako eremua ere kontsideratu da kasu guztietan.

II.23. Taula: eraikin-arketipo bakoitzaren diseinu-dimentsioak eta orientazioa.

| Eraikin-arketipoa | Esleitutako hiri-morfologia | Etxebiz. azalera (m <sup>2</sup> ) | Etxebiz. kopurua solairuko | Eraikin-luzera (m) | Eraikin-zabalera (m) | Fatxadaren U-balioa (W/m <sup>2</sup> K) | Fatxadaren orientazioa |
|-------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------|--|------------------------|
| n. 1              | Bloke lineala               | 60                                 | 2                          | 14                 | 10                   | 1,766                                    | hego-mendebaldea       |
| n. 2              | Bloke lineala               | 75                                 | 2                          | 17                 | 10                   | 1,766                                    | hego-mendebaldea       |
| n. 3              | Bloke solidoa               | 60                                 | 2                          | 8                  | 17,5                 | 2,043                                    | mendebaldea            |

|       |                  |     |   |      |      |       |                  |
|-------|------------------|-----|---|------|------|-------|------------------|
| n. 4  | Bloke solidoa    | 75  | 2 | 14   | 12,1 | 1,766 | mendebaldea      |
| n. 5  | Bloke solidoa    | 105 | 2 | 17   | 13,5 | 1,766 | mendebaldea      |
| n. 6  | Bloke solidoa    | 120 | 2 | 20   | 13,0 | 1,766 | mendebaldea      |
| n. 7  | Bloke lineala    | 60  | 3 | 20   | 10   | 1,259 | hego-mendebaldea |
| n. 8  | Bloke lineala    | 75  | 3 | 24,5 | 10   | 1,259 | hego-mendebaldea |
| n. 9  | Bloke lineala    | 60  | 3 | 9,1  | 22   | 1,259 | hego-mendebaldea |
| n. 10 | Bloke lineala    | 75  | 3 | 11,1 | 22   | 1,380 | hego-mendebaldea |
| n. 11 | Bloke solidoa    | 105 | 3 | 17   | 19,7 | 1,259 | mendebaldea      |
| n. 12 | Bloke lineala    | 60  | 3 | 20   | 10   | 1,380 | hego-mendebaldea |
| n. 13 | Bloke lineala    | 75  | 3 | 9,4  | 26   | 1,380 | hego-mendebaldea |
| n. 14 | Eraikin bereizia | 105 | 3 | 18,3 | 18,3 | 1,380 | -                |
| n. 15 | Bloke lineala    | 75  | 3 | 20,4 | 12   | 0,626 | hego-mendebaldea |
| n. 16 | Bloke lineala    | 75  | 3 | 13,6 | 18,1 | 0,934 | hego-mendebaldea |
| n. 17 | Bloke lineala    | 75  | 3 | 18   | 13,6 | 0,750 | hego-mendebaldea |

Azkenik, INEren datuetatik [50] ondoriozta daiteke sotoetako garajeak ez zirela arruntak izan 80ko hamarkadara arte. Horrela, 1981-2005 aldiko eraikin gehienek (%70 inguru) garaje bat dute euren sotoan eta, beraz, garaje hauek kontsideratu egin dira 15, 16 eta 17. eraikin-arketipoen ereduetan.

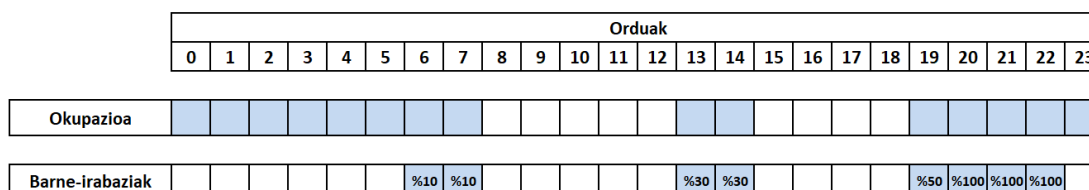
### II.2.3. Ereduen kalibraketa

Atal honetan, eraikin-arketipoen ereduetan sartu diren okupazio, berokuntza eta barne-irabazien profilak azaltzen dira. Hauek definitzeko, berokuntza-sistema zentralak dituzten etxebizitza-eraikinen kontsumo-datu errealak erabili dira.

Lehenik eta behin, balizko egoerak definitzeko, hiru profil horien arteko erlazioak ezarri dira:

- Etxebizitzaren okupazio aktiboan zehar berokuntzako kontsigna-tenperatura uneoro dela aplikagarria jotzen da.
- Argiztapenarekin eta etxetresnekin lotutako barne-irabazi termikoak batera definitzen dira, eta etxebizitza okupatuta dagoen bitartean soilik existitzen direla jotzen da, gauetan izan ezik. Hau da, argiztapenaren eta etxetresnen barne-irabaziak etxebizitzaren okupazio “aktiboan” zehar baino ez dira ematen.

Bestalde, profilen definizioan eragin nabarmena izan dezakeen faktore garrantzitsu bat bizilagunen lan-egoera da. INEren datuen arabera [50], eraikin-arketipo bakoitzaren etxebizitzen gehiengoak bizilagun guztiak ditu lanean. Beraz, ohiko lan-ordutegi bati dagokion erreferentziako okupazio profila zehaztu da (II.9. Irudia). Halaber, horrekin lotutako barne-irabazien profila definitu da, CTEk okupazio-epe aktiboetarako ematen dituen zatikiak erabiliz (8,8 W/m<sup>2</sup>-ko ekarpen maximoarekiko).



II.9. Irudia: lan-egunetako erreferentziako okupazio profila.

Asteburuetarako hurrengo profilak definitu dira, etxebizitza uneoro okupatuta dagoela kontsideratuz.

| Orduak          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
|                 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21   | 22   | 23   |
| Okupazioa       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |
| Barne-irabaziak |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    | %30 | %30 | %30 | %30 | %30 | %30 | %30 | %30 | %30 | %50 | %100 | %100 | %100 |

#### II.10. Irudia: asteburuatarako erreferentziako okupazio profila.

Azaldutako profiletan oinarrituta, sei berokuntza-egoera ezberdin definitu dira (A, B, C, D, E, F), kontsigna-tenperaturaren arabera sailkatuz (19 °C, 20 °C, 21 °C) eta kontsigna hori gauetan zehar ere aplikagarria den ala ez bereiziz (II.24. Taula).

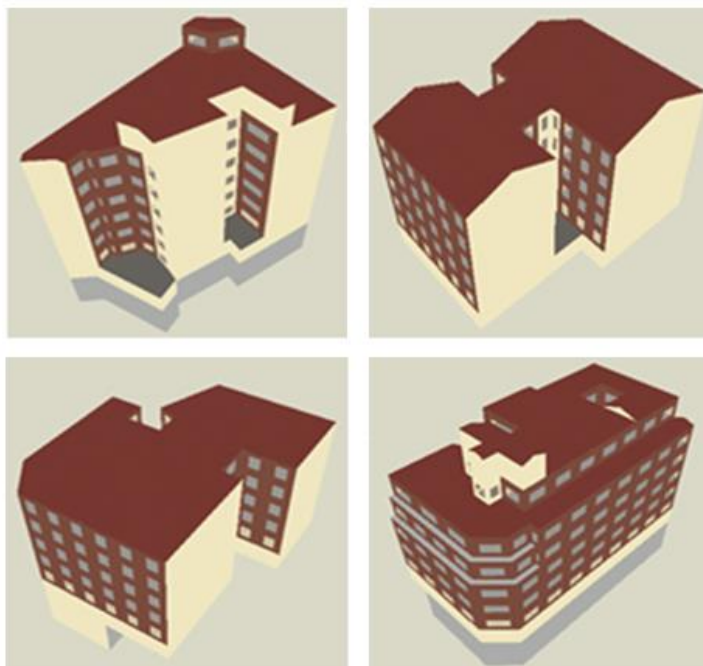
#### II.24. Taula: definitutako sei berokuntza-egoerak.

|                            |     | Berokuntzaren kontsigna-tenperatura |        |        |
|----------------------------|-----|-------------------------------------|--------|--------|
|                            |     | 19 °C                               | 20 °C  | 21 °C  |
| Gauan zeharreko berokuntza | Ez  | Eg. A)                              | Eg. B) | Eg. C) |
|                            | Bai | Eg. D)                              | Eg. E) | Eg. F) |

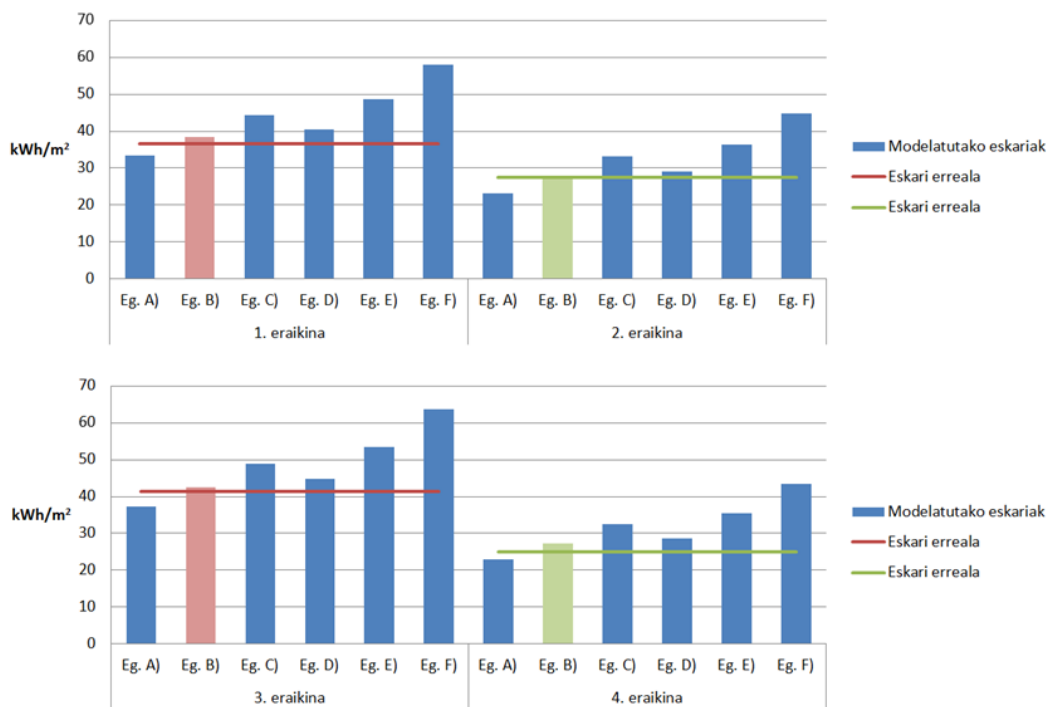
Bestalde, Bilboko lau bizitegi-eraikin erreal aukeratu dira, kokapen eta orientazio ezberdinekoak, eta beren forma, tamaina, jarraitutasun, orientazio eta barneko patioen arabera modelatu dira Design Builderren. Eraikinen neurriak Bizkaiko katastroaren bisorea erabiliz neurtu dira, itzala eragin dezaketen kanpoko elementuak ere kontsideratuz. Lau eraikinek 107 etxebizitzez osatuta daude guztira, zeinen berokuntza-eskarien datuak urteko fakturen bitartez jaso dira.

Horrela, definitutako sei egoerak lau eraikinetako bakoitzean simulatu dira. Lortutako berokuntza-eskarien balioak eraikinaren urteko benetako eskariekin alderatu dira, eskari errealera zehaztasun handiagoz hurbiltzen den berokuntza-egoera hautatzeko. Hainbat urtetako eskarien batez bestekoa kontsideratzen da eskari errealtzat, sasoi bateko baldintza klimatiko espezifikoaren menpekoa ez izateko.

II.12 Irudian ikus daitekeenez, emaitzak asko aldatzen dira simulatutako egoeraren arabera; hau da, modelatutako okupatzaileen portaeraren arabera. Eraikin guztietan, B. egoera da errealitatera gehien hurbiltzen den berokuntza-eskaria itzultzen duena eta, beraz, eraikin-arketipoen ereduetan ezarri dena. Egoera hay 20°C-ko kontsigna-tenperatura bati dagokio, gauetan bertan behera uzten dena.



II.11. Irudia: aztertutako lau bizitegi-eraikinen Design Builderreko ereduak.



II.12. Irudia: simulazioen bidez lortutako berokuntza-eskarien balioen alderaketa eskari errealarekin.

20°C-ko kontsigna-temperatura bat dator Eustaten Ingurumen Inkestaren emaitzekin [122]; izan ere, azken honek 20°C inguruko batez besteko berokuntza-kontsigna estimatzen du Euskadin. Halaber, INEren arabera [123] Euskadin oso baxua da gauean berokuntza itzaltzen ez duten etxebizitzaren zatia (%8,7). Bi aspektuak egokitze dira, beraz, B egoeraren hipotesietara.

### II.3. Ereduen baliozkotzea

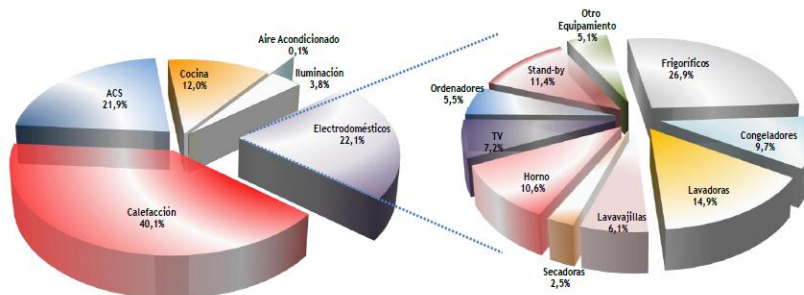
Modelatu eta simulatu diren eraikin-arketipo ereduen doitasun eta fidagarritasuna frogatzeko, modelazioaren emaitzak datu enpirikoekin alderatu beharra dago.

Datu horiek bildu eta maneiatzeko, Bilbo eta bere inguruko eremuan aplikatu da proposatutako metodologia. Atal honek burututako analisia deskribatzen du.

#### II.3.1. Literaturaren analisia

Atal honetan, bi informazio iturri aztertu dira nagusiki: SECH-SPAHOUSEC proiektuaren emaitzak [62] eta Energiaren Euskal Erakundeak (EEE) argitaratutako *Claves energéticas del sector doméstico en Euskadi* dokumentua [66], Euskadiko bizitegi-sektorearen energia erabilera aztertzen dituena.

Alde batetik, SECH-SPAHOUSEC proiektuak Atlantikoko zona klimatikoarentzako emandako bizitegi-kontsumoaren banaketa II.13. Irudian erakusten da. Berokuntza da etxebizitzaren kontsumo osoaren zatirik handiena, %40, hartzen duen azken erabilera. Bestalde, zonalde klimatiko horretan kokatutako etxebizitzaren urteko batz besteko energia kontsumoa 10.331 kWh da. Beraz, berokuntzari dagokion zatia aplikatuz 4.143 kWh-ko urteko batzbesteko berokuntza-kontsumoa lortu da. 93,7 m<sup>2</sup>-ko batzbesteko etxe-azalera kontsideratuz (proiektu horrek ezarritakoa), balio hori 44 kWh/m<sup>2</sup>-ko berokuntza kontsumoari dagokio.



II.13. Irudia: SECH-SPAHOUSEC proiektuak Atlantikoko zona klimatikoarentzako emandako bizitegi-kontsumoaren banaketa.

Bestetik, EEEren analisiak 5,130 kWh-ko batz besteko gas natural kontsumoa estimatu zuen hori erregai moduan erabiltzen duten Bizkaiko etxebizitzetan (gehiengoa direnak). Halaber, EEEk 87 m<sup>2</sup>-ko batzbesteko etxebizitza-azalera kontsideratu zuen Euskadi mailan, Bizkaiari ere esleitu dakiokena (izan ere INE-k 85,5 m<sup>2</sup> adierazten ditu Euskadirentzat eta 84,7 m<sup>2</sup> Bilborentzat [50]). Azkenik, EEEren arabera Euskadiko etxeetan erregai-kontsumoaren %62 berokuntzara bideratuta dagoela kontsideratuz (II.14. Irudia), 37 kWh/m<sup>2</sup>-ko urteko batzbesteko berokuntza kontsumoa lortuko litzateke, SECH-SPAHOUSEC proiektutik ondorioztatutakoa baino apur bat txikiagoa. Hala ere, EEEk bere analisian erabilitako kontsumo-balioak 2011. urteari dagokie, klimatikoki ohikoa baino leunagoa izan zena. Hori dela eta, 2011ko kontsumo-balioak joera historiaren azpitik egon ziren.

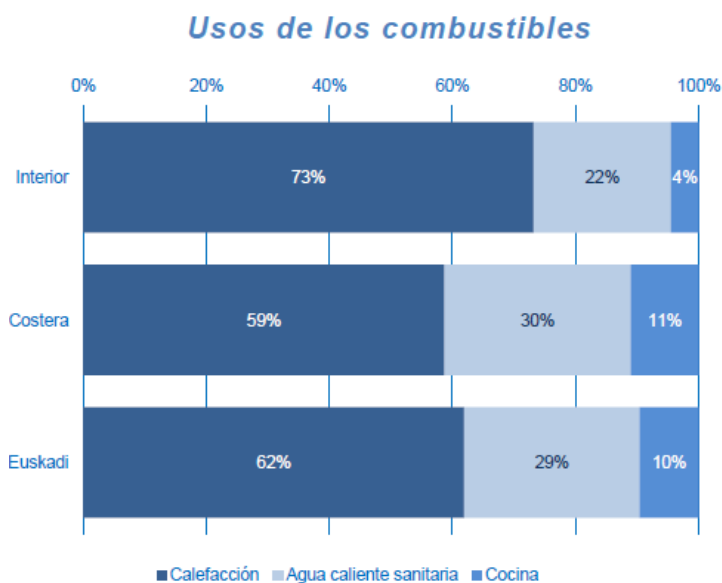
Halaber, Orkestra institutuaren beste lan batek 0,63 tep-ko urteko batz besteko energia-kontsumoa estimatzen du Euskadiko etxeetan [124], berokuntzari %50 esleituz. INEk Euskadiko



bizitegi-parkearentzat ematen duen  $85.5 \text{ m}^2$ -ko batuz besteko etxe-azalera kontsideratuz [50],  $43 \text{ kWh/m}^2$ -ko urteko berokuntza kontsumoa estima daiteke.

Beraz, lortutako berokuntza balioak alderatuz, kontsistentzia handia berresten da aztertutako informazio-iturri ezberdinen artean.

Bestalde, Euskadiko erregai-kontsumoari dagokionez, EEEk II.14. Irudiako kontsumo termikoen egitura ematen du. Kostaldeko egitura hori eraikin-arketipo ereduak baliozkotzeko erabilitako metodo guztietan erabili da; hots, erregai-kontsumoaren inkestan (laginaren analisisan), erregresio lineal anizkoitzan erabilitako datuen prestakuntzan eta maila agregatuzko baliozkotzean.



II.14. Irudia: Euskadiko erregai-kontsumoaren banaketa, EEEren arabera.

### II.3.2. Erregai-kontsumoaren inkesta

#### II.3.2.1. Laginaren gutxieneko tamainaren kalkulua

Erregai-faktura errealak eskuratzeko arazoak direla eta, Bizkaia probintzia osoko bizitegi-parkea kontsideratu da populazio moduan, Bilbora soilik mugatu beharrean. Bizkaiko etxebizitza nagusien kopurua INEtik lortu da [50].

Populazioarentzako espero den bariantza definitzeko, lehenik eta behin zenbait etxebizitzaren erregai-kontsumoa bildu da, behin – behineko inkesta lez, eta bere desbideratzea kalkulatu da. II.25 Taulak laginaren gutxieneko tamainaren kalkuluan erabilitako parametroak laburbiltzen ditu, etxebizitzaren urteko batuz besteko berokuntza-kontsumoa lortzeko  $6 \text{ kWh/m}^2$ -ko errore-marjinarekin eta %90eko konfiantza-tartearekin.

II.25. Taula: laginaren gutxieneko tamainaren kalkulua, batuz besteko berokuntza-kontsumoa balioesteko.

| Urteko batuz besteko berokuntza-kontsumoa |   |                     |
|---|---|---------------------|
| Populazioa                                | N | 467.295             |
| Errore-marjin onargarria                  | e | $6 \text{ kWh/m}^2$ |
| Konfiantza-tartea                         |   | %90                 |

|  |                              |  |
|--|------------------------------|--|
| <b>Bataz bestekotik desbideratzea konfiantza-tartea lortzeko</b> | <b>Z</b>                     | 1,645                                  |
| <b>Populazioarentzako espero den bariantza</b>                   | <b><math>\sigma^2</math></b> | 700 (kWh/m <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> |
| <b>Laginaren gutxieneko tamaina</b>                              | <b>n</b>                     | 53                                     |

UBS kontsumoari dagokionez, 6 L/pertsona eguneko errore-marjina eta %90eko konfiantza-tartea kontsideratu dira, II.26 Taulak laginaren gutxieneko tamainaren kalkuluan erabilitako parametroak laburbiltzen ditu.

**II.26. Taula: laginaren gutxieneko tamainaren kalkulua, bataz besteko UBS kontsumoa balioesteko.**

| <b>Eguneko bataz besteko UBS litro kontsumoa</b>                 |                              |                                 |
|--|------------------------------|---------------------------------|
| <b>Populazioa</b>  | <b>N</b>                     | 467.295                         |
| <b>Errore-marjin onargarria</b>                                  | <b>e</b>                     | 6 L/perts-egun                  |
| <b>Konfiantza-tartea</b>   |                              | %90                             |
| <b>Bataz bestekotik desbideratzea konfiantza-tartea lortzeko</b> | <b>Z</b>                     | 1,645                           |
| <b>Populazioarentzako espero den bariantza</b>                   | <b><math>\sigma^2</math></b> | 600 (L/perts-egun) <sup>2</sup> |
| <b>Laginaren gutxieneko tamaina</b>                              | <b>n</b>                     | 45                              |

### II.3.2.2. Inkestan bildutako lagina

Guztira, 65 etxebizitzaren erregai-kontsumoaren datuak jaso dira.

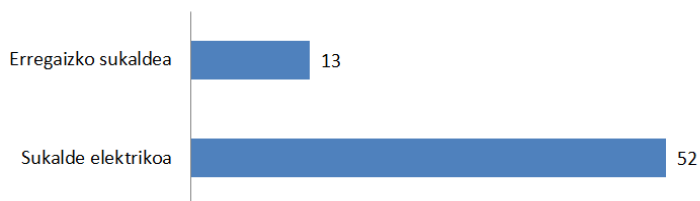
UBS-rako edota sukalderako, baina ez berokuntzarako, erregaia kontsumitzen duten etxebizitzak alde batera utzi dira. Gauza bera egin da duela gutxira arte hutsik egon diren etxebizitzekin edo berriki hornitzaile komertziala aldatu dutenekin, ez baitute fakturazio-datu nahikorik urtebeteko aldi oso bat betetzeko. Bestalde, bildutako kontsumo-datu historikoen grafikoek azken bi urteetako informazioa dutenez, analisisian bi urteen arteko bataz besteko balioak erabili dira.

II.27 Taulak inkestan kontsideratutako etxebizitzaren kokapena adierazten du. Ikus daitekeenez, etxebizitzaren erdia Bilbori dagozkie, gainerakoak inguruko udalerrietakoak izanik.

**II.27. Taula: inkestako etxebizitzaren kokapenaren banaketa.**

|                               | <b>Etxebizitza kopurua</b> | <b>Zatia</b> |
|-------------------------------|----------------------------|--------------|
| <b>Bilbo</b>                  | 31                         | %48          |
| <b>Getxo</b>                  | 12                         | %18          |
| <b>Bizkaia (beste batzuk)</b> | 22                         | %34          |
| <b>Guztira</b>                | 65                         |              |

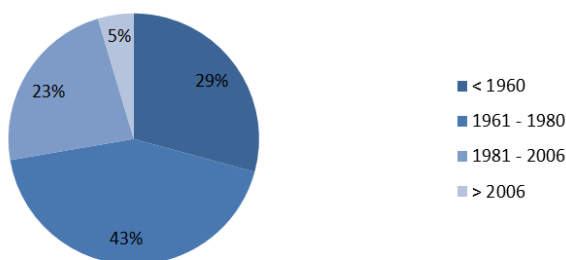
Inkestatutako etxebizitzek erregaia kontsumitzen dute berokuntzarako eta UBS ekoizteko, gutxienez, baina guztiek ez dute sukalderako erabiltzen. II.15. Irudiak sukaldean erregaia erabiltzen duten etxebizitzaren zatia adierazten du.



II.15. Irudia: inkestako etxebizitzaren sukalde-motaren banaketa.

Etxebizitzaren helbidea erabiliz, beren eraikuntza-aldia Bizkaiko katastrofik hartu da, II.16. Irudiko banaketa lortuz. Bilboko bizitegi-parkearen antzinatasun banaketarekin alderatuz, laginean 1981-2005 aldiko etxebizitzaren pisua zertxobait altuagoa da.

### Eraikuntza-aldia



II.16. Irudia: inkestako etxebizitzaren eraikuntza-aldiaren banaketa.

### II.3.2.3. Laginaren azterketa

#### II.3.2.3.1. Lehenengo ikuspegia

Udako eguneko UBS per-capita kontsumoa kWh-tako unitateetatik litroetara pasatzeko, sareko uraren batez besteko tenperatura 20°C dela jotzen da, Bilboko udako batez besteko tenperaturari dagokiona, gutxi gorabehera. Halaber, UBS 60°C-tan ekoizten dela kontsideratu da.

Ondoren, alderantziz egin da. Eguneko UBS per-capita litro-kontsumotik UBSari dagokion urteko energia kontsumoa kWh-tan lortzeko, Bilboko urteko batez besteko tenperatura erabili da (14,03 °C) sareko uraren tenperatura gisa.

#### II.3.2.3.2. Bigarren ikuspegia

Bigarren ikuspegiaren aplikazioa EEEK emandako azken-erabilera termikoen arabeko erregai-kontsumoaren banaketan oinarritu da. Halaber, banaketa horretatik beste banaketa baliokide bat ondorioztatu da sukalde elektrikoa duten etxebizitzentzat. Horrela, II.28. Taulak bigarren ikuspegiaren aplikaturiko erregai-kontsumo egiturak erakusten ditu.

II.28. Taula: azken-erabilera termikoen araberako erregai-kontsumoaren banaketak.

|                   | Ondorioztatutako erregai-kontsumo egitura                            |   |
|-------------------|--|---|
|                   | Erregaia hiru erabilera termikoetarako erabiltzen duten etxebizitzak | Erregaia berokuntzarako eta UBS-rako soilik erabiltzen duten etxebizitzak |
| <b>Berokuntza</b> | %59  | %66   |
| <b>UBS</b>        | %30  | %34   |
| <b>Sukaldea</b>   | %11  | -   |

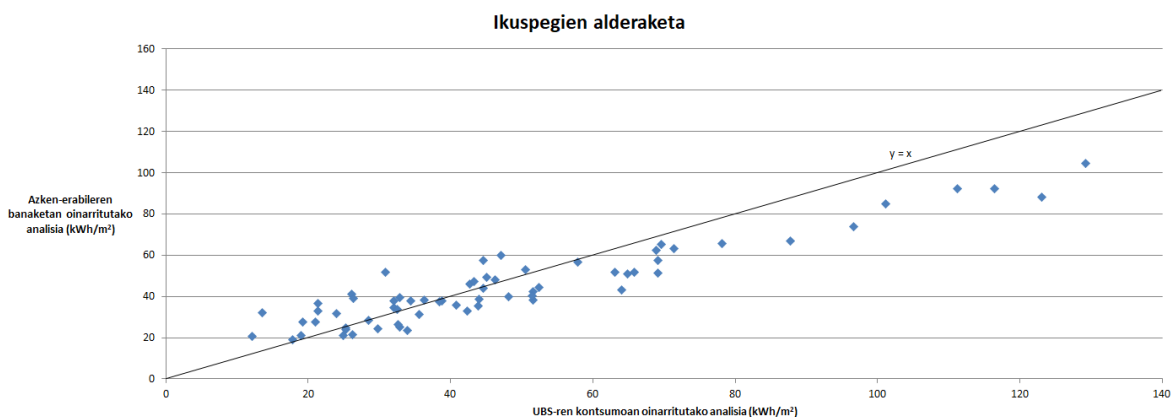
#### II.3.2.4. Emaitzen alderaketa

Ikuspegi bakoitzarekin lortutako berokuntza eta UBS kontsumoen bataz besteko balioak eta desbideratzeak II.29. Taulan laburbiltzen dira. Emaitzak antzekoak izateak adierazten du UBS kontsumoaren estimazioan oinarritutako ikuspegiak EEEn datuetatik ondorioztatutako azken-erabileren banaketa baliozkotu egin duela. Bestalde, lortutako desbideratzeek laginaren tamaina minimoa kalkulatzeko suposatutako bariantzak berretsi dituzte.

II.29. Taula: Ikuspegi bakoitzarekin lortutako berokuntza eta UBS kontsumoen bataz besteko balioak eta desbideratzeak.

|                                    |                                      | 1. ikuspegia | 2. ikuspegia |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| <b>Urteko berokuntza kontsumoa</b> | Bataz bestekoa (kWh/m <sup>2</sup> ) | 48,98        | 44,67        |
|                                    | Desbideratzea (kWh/m <sup>2</sup> )  | 26,95        | 19,09        |
| <b>Eguneko UBS kontsumoa</b>       | Bataz bestekoa (L/perts)             | 37,18        | 43,39        |
|                                    | Desbideratzea (L/perts)              | 23,61        | 23,33        |

Aplikaturako bi ikuspegiekin lortutako urteko berokuntza kontsumoaren (kWh/m<sup>2</sup>) emaitza desagregatuak alderatuz, II.17. Irudia eratu da. Ikus daitekeenez, ikuspegi bakoitzetik lortutako balioak antzekoak dira, bi metodoen arteko kontsistentzia egokia adieraziz. Hala ere, badirudi berokuntza-kontsumo altuen kasuan, lehenengo ikuspegiak (UBS kontsumoan oinarritzen dena, alegia) kontsumo horiek gutxiesten dituela bigarren ikuspegiarekin konparatuz (EEEko energia-erabileren banaketan oinarritutakoa).



**II.17. Irudia: bi ikuspegiekin balioetsitako urteko berokuntza kontsumoaren emaitza desagregatuen alderaketa.**

Bestalde, lehenengo ikuspegiaren aplikaziotik lortzen den erregai-kontsumoaren banaketa kalkulatu da, azken-erabileren arabera, erregai hiru erabilera termikoetarako (berokuntza, UBS, sukaldea) kontsumitzen duten etxebizitzentzat eta baita berokuntzarako eta UBSrako soilik erabiltzen dutenentzat ere (II.30. Taula). Azken hauetan, lortutako erregai-banaketa EEEK emandakoaren (eta 2. ikuspegian erabilitakoaren) berdina da ia (II.28. Taula), emaitzen kontsistentzia indartuz. Erregaizko sukaldea duten etxebizitzetan, aldiz, lortutako kontsumo-banaketa zertxobait aldentzen da EEEKo banaketatik, erregaizko sukaldeko lagin-kopuru txikiagoaren ondorioa izan daitekena.

**II.30. Taula: lehenengo ikuspegian balioetsitako erregai-kontsumoaren banaketa, azken-erabileren arabera.**

|            | Erregaizko sukaldea duten etxebizitzak | Sukalde elektrikoa duten etxebizitzak |
|------------|--|---------------------------------------|
| Berokuntza | %62                                    | %67                                   |
| UBS        | %22                                    | %33                                   |
| Sukaldea   | %16                                    | -                                     |

**II.3.3. Erregresio lineal anizkoitzaren erudia**

Atal honek deskribatutako erregresioaren aplikazioaren helburua etxebizitza mota ezberdinen berokuntza-eskariak lortzea izan da, eraikin-arketipo ereduak era desagregatuan baliozkotzeko modu osagarri gisa. 3.2.1.3.3. atalean proposaturiko metodoa jarraituz, erregresio lineal anizkoitza eskualde-mailan aplikatu da.

**II.3.3.1. Udalerrietako bizitegi-sektoreen urteko berokuntza-eskarien estimazioa**

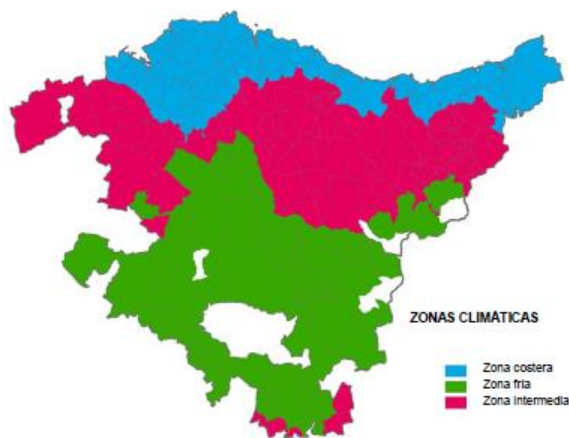
Euskadin, Agenda 21eko testuinguruan, udalerrri askok Tokiko Ekintza Planak (TEP) ezarri zituzten. 2003an Eusko Jaurlaritzak gida bat argitaratu zuen Tokiko Iraunkortasun Adierazle ezberdinak ezarritz [125]. Besteak beste, udalerrriko gas natural kontsumo totala eta bere banaketa sektoriala, bizitegi-sektorea bereiziz.

Guztira, Bizkaiko eta Gipuzkoako 17 udalerrrien gas natural bizitegi-kontsumoak biltzea lortu da, II.31. Taulan adierazten direnak. Lehenago, 4.000 biztanle baino gutxiagoko udalerrriak alde batera utzi dira, beren etxebizitza kopuru txikiagoak datu estatistikoaren zehaztasuna murriztu dezakelako.

II.31. Taula: erregresian sartutako udalerriak.

| Bizkaia      | Populazioa | Gipuzkoa    | Populazioa |
|--------------|------------|-------------|------------|
| Bilbo        | 349.370    | Donostia    | 184.425    |
| Barakaldo    | 99.530     | Irun        | 60.515     |
| Portugalete  | 47.610     | Errenteria  | 39.135     |
| Durango      | 28.240     | Hernani     | 19.220     |
| Mungia       | 16.740     | Hondarribia | 16.295     |
| Arrigorriaga | 12.475     | Pasaia      | 15.690     |
| Abanto       | 9.680      | Azpeitia    | 14.310     |
| Muskiz       | 7.460      | Ibarra      | 4.250      |
| Berango      | 6.885      |             |            |

EEEren banaketa klimatikoa kontsideratuz (II.18. Irudia), konprobatu da ia udalerrri guztiak kostaldeko zonaldean kokatzen direla. Beraz, erregresioa aplikatzeko koherentzia-baldintza hori betetzen dute, batzuk hertsiki EEEk bitarteko zonaldeetat definitzen duenaren barruan kokatzen diren arren: kostaldeko zonaldeetik gertu daudenez, azken honetan kontsidera daitezke.



II.18. Irudia: EEEk emandako Euskadiren banaketa klimatikoa [66].

Horrela, udalerrri hauetako gas natural bizitegi-kontsumoak bildu dira, 2005-2011 aldiko urte ezberdinetan zehar. Bildutako informazioa azertu ostean, muturreko ezohiko edo muturreko zenbait balio alde batera utzi dira.

Gainerakoak, udalerrrien bizitegi-sektoren berokuntza-kontsumoak estimatzeko erabili dira, horretarako EEEk emandako azken erabilera termikoen arabera erregai-kontsumo banaketa erabiliz (II.14. Irudia).

Berokuntza-kontsumo horiek eskari terminoetara pasatzeko, udalerrri ezberdinen berokuntza-sistemen banaketa [50] [111] eta sistema horietako bakoitzarentzat IDAEk emandako sasoiko batez besteko efizientziak erabili dira [54].

Bestalde, gas naturalarekin ez ezik, beste energia-iturri eta erregai batzuekin ere asetzen da udalerrri bateko etxebizitzaren berokuntza-eskaria; hala nola, elektrizitatea, GLP edo gasolioa. Hala ere, lehenengoak azken energia-erabilera ugari asetzen ditu eta zaila da berokuntzari dagokion kontsumoaren zatia estimatzea. Beste erregaien kontsumoari buruzko informaziorik ez dago normalean eskuragai.

Beraz, gainerako energia-iturri hauekin asetutako berokuntza-eskaria estimatzeko, gas naturalari lotutako eskariaren balioa estrapolatu egin da bizitegi-sektorearen berokuntza-eskari totala lortzeko. Horretarako, gas naturalezko berokuntza sistemak erabiltzen dituzten etxebizitzaren azaleraren zatia kontsideratu da, udalerriko bizitegi-parkearen azalera totalarekiko.

### II.3.3.2. Erregresioan sartutako etxebizitza-motak

Idelaki, erregresioan sartu beharreko etxebizitza-motak modelatutako eraikin-arketipoen berdinak izan beharko lirateke. Halere, laginaren tamaina da oro har etxebizitzaren bereizketaren sakontasuna mugatzen duena.

Analisi honetan, 17 udalerriko laginarekin, etxebizitza-moten sailkapen sinplifikatua erabili da, etxebizitza tipologiak eraikuntza-aldiaren arabera bereiziz (II.32. Taula). Halaber, 2006aren osteko etxebizitzaren pisu txikia dela eta, hauek analisisik kanpo utzi dira. Horrela, erregresioan sartutako etxebizitza-tipologia kopuruak tipologia bakoitzeko gutxienez bost lagin izatearen arau orokorra betetzen du.

II.32. Taula: erregresioan sartutako etxebizitza-tipologiak.

|                         | 1. tipologia      | 2. tipologia | 3. tipologia |
|-------------------------|-------------------|--------------|--------------|
| <b>Eraikuntza-aldia</b> | 1960a baino lehen | 1961 - 1980  | 1981 – 2005  |

II.33. Taulak erregresioan erabilitako balioak adierazten ditu. Etxebizitza-tipologia bakoitzaren zatia etxebizitza nagusien azalera totalean oinarritzen da, udalerriko bizitegi-parke osoaren azalarekiko.

II.33. Taula: erregresioan erabilitako sarrera-satuak.

|              | Udalerriko bizitegi-sektorearen urteko berokuntza-eskaria (kWh/m <sup>2</sup> ) | 1. tipologiako etxebizitzak | 2. tipologiako etxebizitzak | 3. tipologiako etxebizitzak |
|--------------|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Abanto       | 32,42   | %28,14                      | %30,50                      | %41,36                      |
| Arrigorriaga | 40,20   | %14,04                      | %33,52                      | %52,45                      |
| Azpeitia     | 36,26   | %24,94                      | %37,90                      | %37,16                      |
| Barakaldo    | 47,22   | %26,34                      | %59,19                      | %14,47                      |
| Berango      | 34,57   | %8,15                       | %27,77                      | %64,09                      |
| Bilbo        | 43,48   | %35,86                      | %46,33                      | %17,81                      |
| Donostia     | 48,66   | %39,76                      | %34,83                      | %25,41                      |



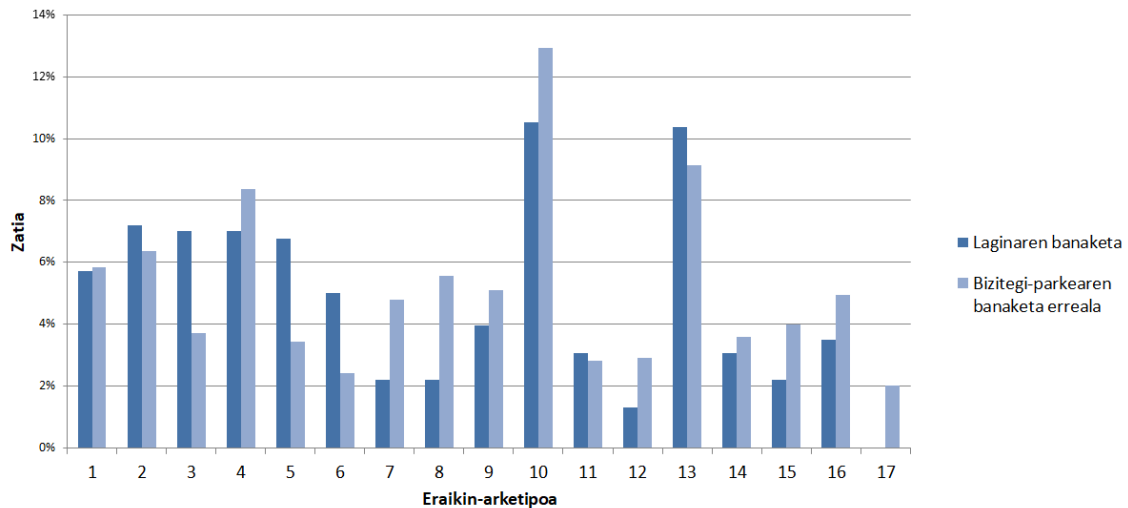
|             |       |        |        |        |
|-------------|-------|--------|--------|--------|
| Durango     | 41,76 | %18,50 | %36,32 | %45,18 |
| Errenteria  | 41,35 | %20,74 | %65,08 | %14,17 |
| Hernani     | 43,67 | %26,80 | %45,14 | %28,06 |
| Hondarribia | 35,85 | %33,63 | %29,48 | %36,89 |
| Ibarra      | 43,17 | %10,27 | %68,42 | %21,31 |
| Irun        | 40,60 | %32,67 | %40,19 | %27,14 |
| Mungia      | 30,84 | %10,68 | %29,93 | %59,39 |
| Muskiz      | 33,18 | %23,46 | %36,22 | %40,32 |
| Pasaia      | 47,94 | %53,30 | %38,16 | %8,54  |
| Portugalete | 38,34 | %23,45 | %60,16 | %16,40 |

### II.3.4. Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagirien analisia

Eusko Jaurlaritzaren Ekonomiaren Garapen, Jasangarritasun eta Ingurumen sailak bere webgunean duen Eraginkortasun Energetikoaren Ziurtagirien erregistroa erabiliz [Registro], guztira Bilboko 228 etxebizitzaren ziurtagiriak aztertu dira.

Horietan energia primarioaren eta CO<sub>2</sub> emisioen balioak bat datoz erregai bakarraren erabileraren ustearekin eta antzeko azken energia-kontsumoa ematen dute. Azken honetatik abiatuz, proposatutako metodologia aplikatu da etxebizitza bakoitzaren berokuntza-kontsumoa lortzeko.

II.19. Irudiak lagineko etxebizitzaren banaketa adierazten du, dagozkien eraikin-arketipoaren arabera, eta bizitegi-parkearen benetako banaketarekin alderatzen du.



II.19. Irudia: lagineko etxebizitzaren alderaketa bizitegi-parkearen benetako banaketarekin.

### II.3.5. Bilboko berokuntza-kontsumo agregatua

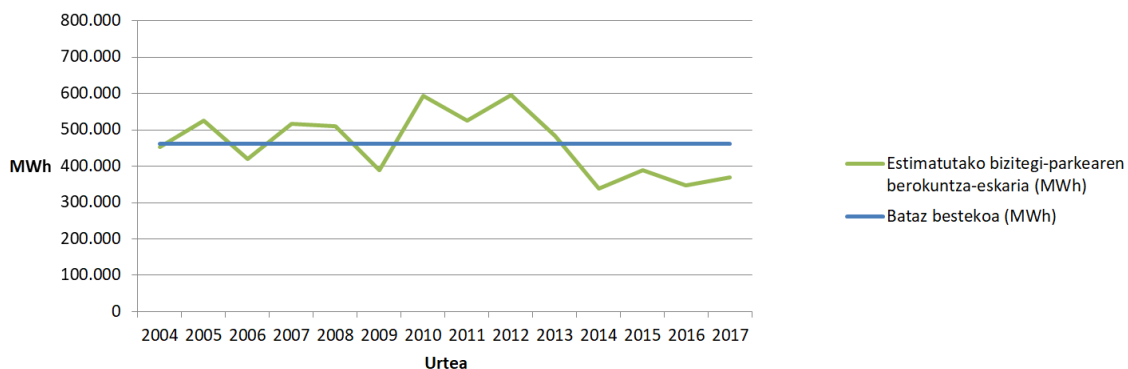
Modelatutako eraikin-arketipoen ereduaren emaitzak era agregatuan balioztatzeko, Bilboko bizitegi-parkearen gas natural kontsumoa aztertu da.



Alde batetik, argitaratutako “Indicadores de Sostenibilidad de Bilbao 2008” dokumentuak [126] kontsumo horren inguruko informazioa ematen du, baina soilik 2000, 2004 eta 2008 urteentzat.

Beraz, Udalaren Mugikortasun eta Jasangarritasun Sailarekin kontaktatu da, Bilboko gas natural kontsumo historikoaren inguruko informazio gehiago eskatzeko. Bere kolaborazioari esker, 2004-2017 aldi osoko urteko gas natural bizitegi-kontsumoak eskuratu dira.

Hauetatik abiatuz, erregresio lineal anizkoitzan jarraitutako prozesu berdina aplikatuz, bizitegi-parkearen urteko berokuntza-eskariak estimatu dira, II.20. Irudian adierazten direnak.



II.20. Irudia: Bilboko bizitegi-parkearen urteko berokuntza-eskarien bilakaera.

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Bizitegi-parkeen birgaitze energetikorako ikuspegi  
integrala: Bilboko kasua**