

Bizi-ziklo analisiaren irismenaren optimizazioa eraikinen birgaitze energetikoen ingurumen- eta ekonomia-analisietan

(Optimization of life-cycle boundaries for environmental and economic assessment of building energy refurbishment assessments)

Xabat Oregi^{1*}, *Maitane Otaño*¹, *Patxi Hernandez*¹, *Rufino Hernandez*²

¹ Tecnalia Research & Innovation, Azpeitia, Spain.

² University of the Basque Country/Architecture, Donostia, Spain.

* xabat.oregi@tecnalia.com

DOI: 10.1387/ekaia.17650

Jasoa: 2017-02-23

Onartua: 2017-05-02

Laburpena: Eraikuntza-sektorerako bizi-ziklo analisiaren metodologia estandarizatu arren, ikertzaileek sistemaren irismenaren inguruan sinplifikazio batzuk aplikatzeko joera dute bizi-zikloaren fase batzuk alde batera utziz. Birgaitze energetikoetan, erabilera-etapan jartzen da arreta bereziki, energiaren erabilera murriztea baita birgaitze horien helburu nagusia. Artikulu honek etxebizitzaren birgaitze energetikoko proiektuetan, ingurumen- eta ekonomia-inpaktu orokorrarekin alderatuta, bizi-zikloko etapa bakoitzaren garrantzia ebaluatzen du. Azterketa kasuko birgaitze-estrategien analisiaren emaitzen arabera, garraio- eta deuseztatze-etapek garrantzi txikia dutela ikusten da. Eraikuntza-prozesuaren etapak ere garrantzi txikia du ingurumen-azterketan. Ekoizpen-, mantentze- eta ordezkatzeko-etapek, oro har, garrantzi handiagoa dute, batez ere, ebaluazio ekonomikorako. Sentsibilitate-analisi zabal batek bizi-zikloaren mugak sinplifikatzeak dakartzan zailtasunak erakusten ditu, azterketa hauek klima, eraikineraren tipologia, edo aurreikusitako erabilera-bizitza bezalako aldagaiekin duten lotura zuzena azalduz.

Hitz gakoak: eraikinen birgaitze energetikoa, bizi-zikloaren ingurumen- eta ekonomia-analisia, bizi-zikloaren irismena, sentsibilitate-analisia.

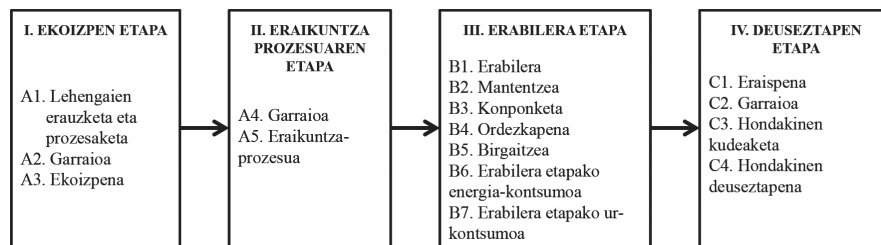
Abstract: Despite the standardization of the life-cycle assessment methodology for the construction sector, analysts tend to apply some simplifications in relation to the system boundaries, omitting some of the life-cycle stages. In particular, for building energy refurbishment projects, there is a general focus on the operational stage, linked to the main objective of reducing operational energy use. This paper evaluates the rele-

vance of each life-cycle stage in relation to the overall environmental and economic impact on residential building energy refurbishment projects. The results from the analysis of the refurbishment strategies at a case study in Spain show the relatively minor importance of the transport and end of life stages. The construction process stage is also of relatively minor importance regarding the environmental performance. The product, maintenance and replacement stages are generally of higher importance, particularly for economic evaluation. An extensive sensitivity analysis demonstrates the difficulties of simplifying the life-cycle boundaries, suggesting that potential simplifications should take into account various parameters, including the climate region, building typologies, and expected service life.

Keywords: Building energy refurbishment, environmental and economic life-cycle assessment, life-cycle boundaries, sensitivity analysis.

1. SARRERA

Eraikuntza-sektorea Europar Batasuneko ingurumenean eragin handienetarikoa duen iturria da, oinarritzko energia-kontsumoaren % 40aren arduradun delarik [1]. Etxebizitza-sektorearen urteko hazkunde-tasa % 1 ingurukoa dela ikusirik [2], 2006tik atzera eraiki eta jada birgaitu ez diren eraikinen energia-portaera hobetzeko aukera izugarria dago, birgaitze energetikoa Europar Batasunaren eta nazio-politiken lehentasuna bilakatuz. Birgaitze horietan oinarrituta, eraikinak gero eta energetikoki eraginkorrago bihurtu eta haien erabilera-etaparen inpaktua oso balio baxuetara murriztuko da, bizi-zikloaren beste etapen ingurumen- eta ekonomia-inpaktuen garrantzia handituz. Tes-tuinguru horretan, Europako Batzordeak [3, 4] eta «Bizi-zikloan zehar zero energiako eraikinen» [5] inguruan egindako lanen arabera, bizi-ziklo analisia (BZA) eraikuntza-proiektuen inpaktuak aztertzeke metodologia egokitzen onartua izan da. BZAren metodologia orokorra ISO 14040:1997 [6] eta 14044:1998 [7] arauetan oinarritzen da. Lehen arau horietan oinarrituta, TC/350 [8] edo ISO TC 59/SC17 [9] bezalako Batzorde Teknikoak eraikuntza-sektorerako arautegi bereziak garatzen dabilta. 1. irudian ikus daitekeen bezala, eraikin baten bizi-ziklo analisiaren irismena eta aztertu beharrezko etapak EN15978:2011 [10] bezalako arautegietan oinarritzen dira.



1. irudia. EN 15978:2011 estandarrean oinarrituriko eraikin baten etapa desberdinak.

Bizi-ziklo analisiaren irismenaren optimizazioa eraikinen birgaitze energetikoen ingurumen- eta ekonomia-analisietan

Hala ere, nahiz eta normalizazio-ahaleginak egin izan, 1. taulan bizi-zikloaren etapa guztiak ebaluatzen dituzten azterketa oso gutxi daudela ikus daiteke.

1. taula. Gaur egungo ikerketa-lanen eraikinen bizi-zikloaren etapak.

	A1-3	A4	A5	B2	B4	B6	C1-4
Zabalza et al., 2009[11]	X					X	
Blom et al., 2010 [12]	X	X		X	X	X	X
Blengini & Di Carlo, 2010 [13]	X	X	X	X	X	X	X
Gustavsoon & Joelsson, 2010 [14]	X	X				X	
Hernandez & Kenny, 2010 [5]	X				X	X	
Ortiz et al., 2010 [15]	X	X	X	X		X	X
Dodoo et al., 2010 [16]	X	X	X			X	X
Malmqvist et al., 2011 [17]	X					X	
Tae et al., 2011 [18]	X	X	X	X		X	X
Wallhagen et al., 2011 [19]	X					X	
Rossi et al., 2012 [20]	X	X				X	
Sharma et al., 2012 [21]	X	X		X		X	
Gazulla & Oregi, 2012 [22]	X					X	X
Iyer & Wong, 2012 [23]	X	X	X		X	X	X
Stephan et al., 2012 [24]	X	X	X	X	X	X	
Cuellar & Azapagic, 2012 [25]	X	X	X	X	X	X	X
Ramesh et al., 2012 [26]	X	X			X	X	
Stephan et al., 2013 [27]	X	X	X	X	X	X	
Asdrubali et al., 2013 [28]	X	X	X		X	X	X
Allacker & De Troyer, 2013 [29]	X	X	X	X	X	X	X
Paulsen & Sposto, 2013 [30]	X	X	X	X	X	X	X
Vrijders & Wastiels, 2013 [31]	X	X	X	X	X	X	
De Angelis et al., 2013 [32]	X	X	X			X	X
Ostermeyer et al., 2013 [33]	X	X	X	X	X	X	
Mosteiro et al., 2014 [34]	X	X	X		X	X	X
Bull et al., 2014 [35]	X				X	X	X
Dodoo et al., 2014 [36]	X		X			X	X
Stephan & Stephan, 2014 [37]	X	X	X	X	X	X	
Russell-Smith et al., 2014 [38]	X	X	X		X	X	
Rodriguez & Freire, 2014 [39]	X	X	X	X	X	X	X
Bastos et al., 2014 [40]	X	X		X	X	X	
Devi & Palaniappan, 2014 [41]	X	X	X			X	X
Cellura et al., 2014 [42]	X	X	X		X	X	X
Assiego de Larriva et al., 2014 [43]	X	X			X	X	X
Cetiner & Edis, 2014 [44]	X	X	X	X	X	X	X
Oregi et al., 2015 [45]	X	X	X		X	X	X

EN15978:2011 [10] eta EN16627:2015 [46] ingurumen- eta ekonomia-arauegietan oinarriturik, artikuluko honek bizi-zikloaren etapa bakoitzaren eta birgaituriko eraikinak bere bizi-ziklo osoan zehar erdietsiriko inpaktumurrizketa orokorraren arteko erlazioa landuko du, ingurumen- eta ekonomia-analisietan bizi-ziklo analisiaren irismenaren sinplifikazioak izan dezakeen eragina aztertuz.

2. AZTERKETA METODOLOGIA ETA HIPOTESIAK

Atal honek lan honetan zehar erabilitako azterketa- metodologia-aren aldagai eta hipotesi nagusiak zehazten ditu. Analisiaren irismen EN15978 [10] arautegian oinarrituko da. Azterketaren emaitzak urteko eta bizitzeko erabilgarria den azalera-unitatearen arabera adieraziko dira. Kasu honetan, eraikinaren erabilera-bizitza (EEB) 50 urtekoa izango da [17]. Sentsibilitate-analisan zehar eraikinaren erabilera-bizitza desberdinak aztertuko dira.

Nahiz eta EN15978 [10] arautegiak BZAren azterketen emaitzak ingurumen-inpaktuaren adierazle desberdinen bidez erakusteko agindu, lan honetan Oinarritzko energia ez-berriztagarrien baliabideen (OEEB) erabilera-adierazlea izango da. Azterketa ekonomikoari dagokionez, erabilitako unitatea «Euroa» izango da.

2. taulan azterketa honetan erabilitako kalkulu-hipotesiak zehazten dira.

2. taula. Azterketa-metodologiaren aldagaiak, informazio-iturriak eta hipotesiak.

Bizi-ziklo etapa	Hipotesiak
Ekoizpena (A1-3)	Ecoinvent [47], GaBi [48] eta Produktuaren Ingurumen Adierazpena (PIA) [49, 50, 51, 52] informazio-iturriak erabiliko dira birgaitze-estrategia bakoitzaren barne-energiaren (BE) inpaktua zehazteko. Inpaktu ekonomikoa informazio-iturri desberdinetan oinarrituko da [53, 54, 55, 56, 57].
Garraioa (A4)	3 garraiatzeko agertoki proposatzen dira: 50 km (probintzia barnekoa), 120 km (eskualde barnekoa) eta 300 km (nazio barnekoa [58]). Garraiatze-kostua «presto» datu-basearen bidez zehaztu da [59].
Eraikuntza-prozesua (A5)	Birgaitze-estrategia bakoitza eraikuntza-prozesuan zehar sorturiko hondakinen kudeaketa-prozesuan zenbatuko da
Mantentzea (B2)	Etaparen honen ingurumen-azterketarik ez da egingo [11]. Azterketa ekonomikoan % 1,5eko inflazio-tasa izango da kon-tuan [60]

Bizi-ziklo analisiaren irismenaren optimizazioa eraikinen birgaitze energetikoen ingurumen- eta ekonomia-analisietan

Bizi-ziklo etapa	Hipotesiak
Ordezkapena (B4)	Informazio-iturri desberdinetan oinarrituta [61, 62], birgaitze-materialen eta sistemen aurreikusitako erabilera-bizitza (AEB) desberdinak zehaztu dira.
Erabilera etapako energia-kontsumoa (B6)	Eraikinen Espainiako arautegiak [63] zehazturiko aldagaietan oinarrituta, Design Builder software-aren bidez eraikinaren energia-eskaria neurtu da [64]. Beste aldagaiak informazio-iturri desberdinen bidez zehaztuko dira: <ul style="list-style-type: none">– Ingurumen konbertsioaren faktorea: gas naturala [47] eta elektrizitatea [65].– Energiaren prezioa [66].– Energia-prezioaren igoera (EPI) [67].
Deuseztapena (C1-4)	Birgaitze-estrategia bakoitzaren parte diren produktuen eta sistemen kudeaketa gunera arteko garraio eta horien deuseztatze-prozesuaren inpaktuak zenbatu dira.

3. AZTERKETA KASUAREN DESKRIBAPENA

Balidazio honetan zehar lorturiko emaitzak gaur egungo eraikin-mul-
tzo gehienetan aplikagarriak izan daitezzen, birgaitze potentzial handia duen
eraikin mota baten analisisian oinarrituko da lan hau: CTE-79 araudia baino
lehen inolako isolamendu termikorik gabe [68] 1960-80 urteen artean erai-
kitako etxebizitza-blokeak. Azpimarratu behar da eraikin mota horrek
ondo ordezkatzeko duela Euskadiko eraikin-parkearen multzo nagusi bat.
Metodologia hau balidatzeko erabilitako eraikina Donostian, Amara au-
zoan, 1963an eraikitako etxebizitza bloke bat izan da (ikus 2. irudia).

Donostiako urteko batez besteko tenperatura 14°C-koa da. Udako batez
besteko tenperatura, aldiz, 20°C-z azpikoa da eta, ondorioz, ez da norma-
lean hozte-sistematik behar, are gutxiago estalpeak edo itzala ematen duten
elementuak eraikinetan erabiliz gero. Neguko batez besteko tenperatura,
ordea, 10°C-koa da gutxi gorabehera; beraz, berogailu-sistemak beharrez-
koak dira.

Aztertutako eraikina hirigune batean kokatzen da beste 4 eraikinen ar-
tean. Hori dela eta, inguruko eraikinek sorturiko itzala faktore garrantzitsu-
tzat hartu behar da. Eraikinaren orientazioa eta inguruko eraikinen garaiera
dela eta, neguko solstizioan, goiko pisuan hego-ekialderantz dauden etxe-
bizitzek bakarrik jasango dute kontuan hartzeko eguzki-irradiazioa. Udan,
berriz, iparralderantz dauden bi fatxadek ez dute ia eguzki-izpi zuzenik ja-
sango.



2. irudia. Donostian kokaturiko balidazio-eraikinaren gaur egungo argazkia.

Eraikina behe solairu komertzial batez eta etxebizitza erabilerako 9 solairuz osatuta dago. Berokuntza-sistema 0,92ko errendimendu nominaldun gas naturalezko sistema zentralizatu batean oinarritzen da. Etxebizitzak aireztapen natural bidez aireztatzen dira eta ur beroaren hornikuntza galdara elektriko batean oinarritzen da. Gaur egungo eraikuntza-sistemaren atal nagusien ezaugarri termikoei dagokienez (ikus 3. taula), jatorrizko arkitektura-dokumentuetan oinarrituta, ondorengo balioak zehaztu dira: fatxada $1,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; estalkia $2,34 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; beirak $5,77 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; eta markoak $4,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Azterketa-metodologiaren aldagaietan oinarrituta, 4. taulak gaur egungo eraikinaren erabilera-etaparen ingurumen- eta ekonomia-inpaktua erakusten du. Balore horietan ikus daitekeen bezala, azterturiko eraikinaren erabilera-etaparen inpaktua oso altua da, birgaitzearen ondoriozko erabilera-etaparen emaitzak oso onak izango direla aurreikusiz.

Bizi-ziklo analisiaren irismenaren optimizazioa eraikinen birgaitze energetikoen ingurumen- eta ekonomia-analisietan

3. taula. Gaur egungo eraikinaren azalaren konposizioa eta U baloreak ($W/(m^2 \cdot K)$) [45].

	Lodiera (mm)	Dentsitatea (kg/m^3)	Eroankortasun termikoa ($W/(m \cdot k)$)	U balorea ($W/(m^2 \cdot K)$)
Fatxada				
Kanpoko zementua	10	1.350	0,70	1,12
Adreilu barne-huts bikoitza	110	930	0,37	
Aire-ganbera	50	NA	Ez dagokio (ED)	
Adreilu barne-huts bikoitza	110	930	0,37	
Igeltsu-plaka	10	825	0,25	
Teilatua				
Zeramikazko teila	20	2.000	1,00	2,34
Aire-ganbera	50	ED	ED	
Hormigoi armatua	200	2.400	2,30	
Lehen solairuko forjatua				
Hormigoi armatua	250	2.400	2,30	1,79
Aire-ganbera	500	ED	ED	
Igeltsu-plaka	15	825	0,25	
Leihoak (% 68 beira eta % 32 markoa)				
Beira simplea (% 60)	6	2.450	*U balorea 5,7	4,71
Beira bikoitza (% 40)	10	2.450	*U balorea 2,7	
Zubi termikoaren hausturarik gabeko aluminiozko markoa (% 60)	ED	ED	*U balorea 5,8	
Zubi termikoaren hausturadun aluminiozko markoa (% 40)	ED	ED	*U balorea 4,2	

4. taula. Azterketa-kasuaren gaur egungo erabilera-etaparen ingurumen- eta ekonomia-inpaktua.

	Energia-erabilera ($MJ/(m^2 \cdot a)$)	Energia-kostua ($€/m^2 \cdot a$)
Berokuntza	350	13,53
Hozkuntza	0	0
Ur beroa	92	10,08
Aireztapena	0	0
Argiztapena	41	4,43
Etxetresnak	240	26,77

5. taula. Azterketa-lanean erabilitako birgaitze-estrategiak.

Estrategia	Eraginkortasun-gradua	Produktuen ingurumenaren barne-inpaktua	Estrategiaren akronimoa
Leihoen ordezkapena (1)	Oinarrizkoa (b)		1b
	Eraginkorra (e)		1e
	Aurreratua (a)		1a
Fatxada aireztatua (2)	Oinarrizkoa	Baxua (l)	2bl
		Altua (h)	2bh
	Eraginkorra	Baxua Altua	2el 2eh
Aurreratua	Baxua Altua	2al 2ah	
	Oinarrizkoa	Baxua Altua	3bl 3bh
Eraginkorra		Baxua Altua	3el 3eh
Aurreratua		Baxua Altua	3al 3ah
Barrukoa (4)	Oinarrizkoa	Baxua Altua	4bl 4bh
		Eraginkorra	Baxua Altua
	Aurreratua	Baxua Altua	4al 4ah
Aire-ganbera (5)	Oinarrizkoa	Baxua Altua	5bl 5bh
		Eraginkorra	Baxua Altua
	Aurreratua	Aire-ganberaren neurrien ondorioz, ezin da aplikatu	
Eguzki-energia termikoa (6)	Oinarrizkoa	—	6b
	Eraginkorra	—	6e
	Aurreratua	—	6a
Eguzki-energia fotovoltaikoa (7)	Eraginkorra	—	7e
	Aurreratua	—	7a

3.1. Energiaren birgaitze-estrategien aukeraketa

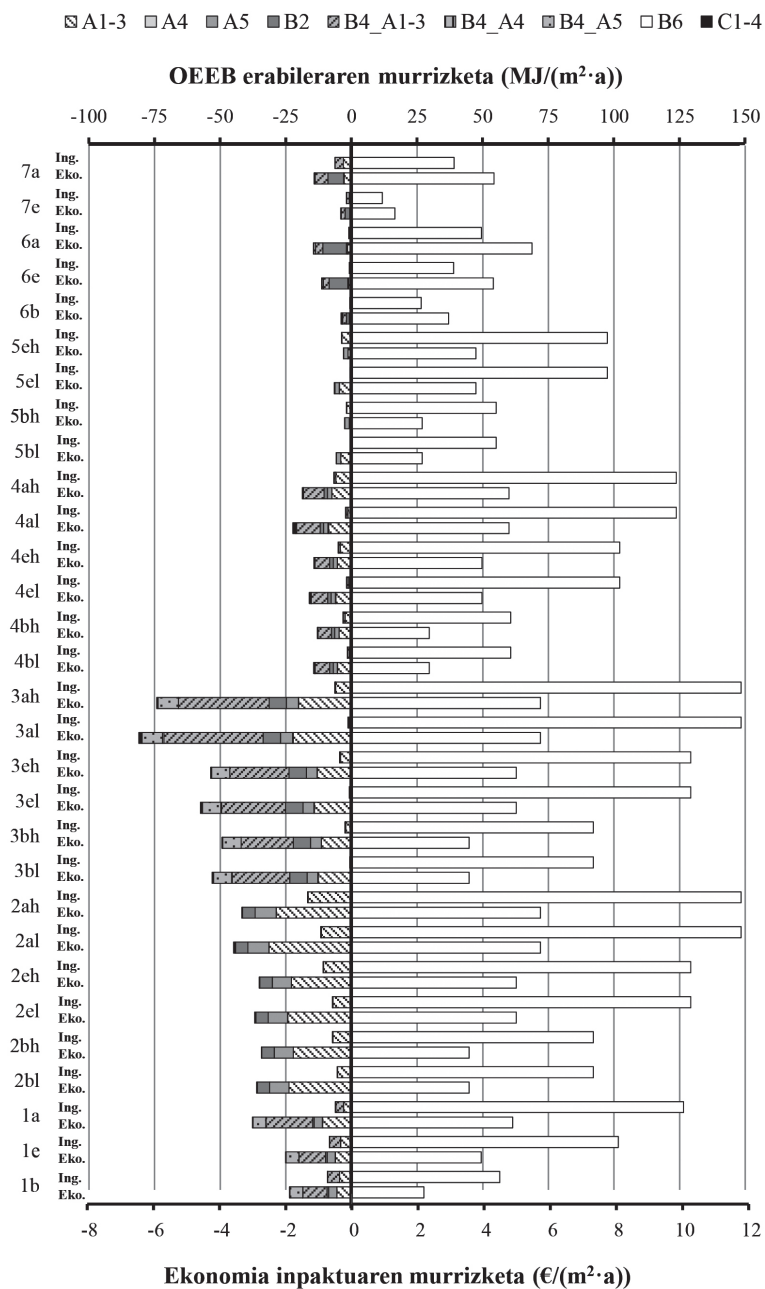
Atal honen helburu nagusietako bat etxebizitzak energetikoki birgaitzeko gaur egun merkatuak eskaintzen dituen estrategia ohikoenak kontuan hartu eta definitzea izango da. Horretarako, 8 estrategia-multzo zehaztu dira (ikus 5. taula): gaur egungo leihoen ordezkapena (1), fatxada aireztatuaren sistema (2), SATE bezala ezagutzen den kanpoko isolamendu-sistema (3), eraikinaren barrualdeko ezaugarri termikoak hobetzea (4), isolamendua fatxadako aire-ganberan injektatzea (5), eguzki-energia termikoaren sistema (6) eta eguzki-energia fotovoltaiakoaren sistema (7). Kalkuluen ikuspuntutik, fatxada aireztatuaren eta SATE sistemaren arteko desberdintasun nagusia sistema horien aurreikusitako erabilera-bizitzaren (AEB) eta ekoizpen-etaparen inpaktuen baloreetan oinarritzen da. Aldi berean, fatxada aireztatuaren aire-ganberak eragin zuzena izango du Design Builder [64] software-aren bidez egindako energia-simulazioetan.

Estrategia horiek eraginkortasun-gradu desberdinetan aplikatuko dira: oinarritzkoa, eraginkorra eta aurreratua. Oinarritzko mailako estrategiak gaur egungo arautegiak zehazten dituen gutxieneko betebeharrak bermatzeko modukoak izango dira. Maila eraginkorren, oinarritzko ezaugarriak % 30ean hobetuko dira, bai ezaugarri termikoetan, bai energia berriztagarrien erabileran. Maila aurreratuko estrategiak, azkenik, hobekuntza handiak dakartzatenak dira. Birgaitze-estrategiak zehazteko garaian erabiliko den azken aldagaia material mota izango da, bizi-ziklo analisian eragin zuzena izango baitu material bakoitzaren ingurumenaren barne-inpaktuak. Horretarako, estrategiak barne-inpaktu altu eta baxuko materialen erabileraren arabera sailkatuko dira.

4. AZTERTURIKO BIRGAITZE ESTRATEGIEN BIZI-ZIKLO OSOAREN ANALISIA

Ondoren aurkeztuko den grafikoaren bidez (3. irudia), azterketa-kasua birgaitzean, bizi-zikloaren etapa bakoitzak izango duen ingurumen- eta ekonomia-inpaktua aztertzen dira. Birgaitutako eraikinaren erabilera-etapan zehar murriztutako inpaktua balore positibo bezala adieraziko da. Bizi-zikloko beste etapa guztien inpaktua, aldiz, balore negatibo bezala adieraziko da.

Ingurumen-analisiari dagokionez, baldintza klimatikoaren edo eraikuntza-ezaugarrien ondorioz, beste bizi-zikloko etapetan sorturiko inpaktuarekin alderatuta, birgaitze-estrategia guztietan erabilera-etapan zehar murrizturiko OEEB kopurua askoz handiagoa dela ikus daiteke. Adibidez, muturreko egoerak aztertuz gero, inpaktu positiboaren eta negatiboaren arteko ezberdintasun txikiena «1b» (leiho bikoitza), «2ah» (fatxada aireztatua) eta «7» (eguzki-energia fotovoltaikoa) birgaitze-estrategietan aurkitzen dira, 6-1, 12-1 eta 6-1 erlazioak hurrenez hurren. Barne-energia baxua



3. irudia. Oinarriarekiko birgaitze-estrategia bakoitzaren OEEB erabileraren (MJ / (m² · a)) eta ekonomia-inaktuaren (€ / (m² · a)) murrizketa. Laburdurak: «Ing.» ingurumen azterketa eta «Eko.» ekonomia azterketa.

edo aurreikusitako erabilera-bizitza handia duten materialetan oinarritzen diren birgaitze-estrategietan, aldiz, erlazio hori asko handitzen da, «5bl» eta «5el» (isolamendua fatxadako aire-ganberan injektatzea) birgaitze-estrategietan 200-1 arteko erlazioa izatera iritsirik.

Analisi ekonomikoari dagokionez, ingurumen-emaitezkin alderatuta, bizi-zikloko zenbait etapak oso eragin handia izango dutela ikus daiteke. Ondorioz, aurreztuko den energia kopuruaren inpaktua baino beste etapen eragina handiagoa izango da. Nabarmentzekoak dira «3» (SATE sistema) birgaitze-estrategiaren multzoko emaitzak, beraien bizi-ziklo osoko analisi ekonomikoaren balantzea negatiboa baita.

5. BIZI-ZIKLOKO ETAPA DESBERDINEN ANALISIA

Atal honek bizi-zikloko etapa bakoitzak birgaituriko eraikinak bere bizi-ziklo osoan zehar murriztuko duen inpaktu osoarekiko duen erlazioa edo ehuneko balorea lantzen du (ikus 6. taulako adibidea).

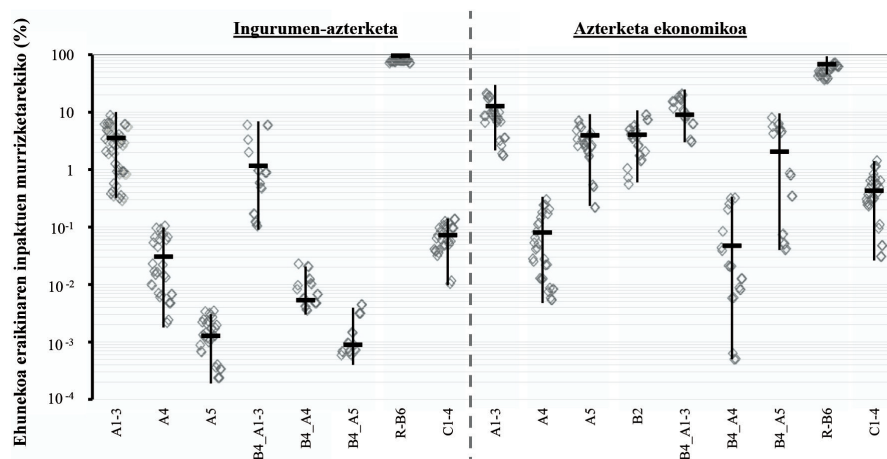
6. taula. Bizi-zikloko etapa bakoitzaren emaitzen adibidea (MJ eta €-tan) eta aukeratutako estrategiaren («2ah») ehuneko balioa.

Bizi-zikloko etapa		Ingurumena		Ekonomikoa	
		(MJ/(m ² · a))	%	(€/m ² · a)	%
Ekoizpena	A1-3	16	10,035	2,3	25,48
Garraioa	A4	0,024	0,014	0,0046	0,05
Eraikuntza-prozesua	A5	0,0021	0,001	0,64	7,04
Mantentzea	B2	—	—	0,38	4,15
Ordezkapena	B4	0	0	0	0
Erabilera etapako energia-kontsumoa (eraikin birgaitua)	B6	148	89,908	5,7	63,00
Deuseztapena	C1-4	0,068	0,041	0,024	0,27
Guztira	Bizi-zikloa	165	100	9,03	100

Ingurumen-azterketari dagokionez (ikus 4. irudia), lorturiko emaitzek zenbait ondorio garbi zehazten dituzte:

- Garraioa (A4), eraikuntza-prozesu (A5) eta deuseztapen (C1-4) etapen eragina % 0,1 baino txikiagoa izango da azterturiko birgaitze-estrategia guztietan.

- Ekoizpen-etapari dagokionez (A1-3), emaitzak % 0,3tik % 10eraino alda daitezke. Ondorioz, lehen fasean ez da komeni etapa hau ebaluazio sistematik ateratzea.
- Beste zenbait lanen emaitzak berretsiz [45, 69, 70], birgaitze-estrategia guztietan erabilera-etapan (B6) murrizturiko ingurumen-inpaktuak duen eragina da garrantzitsuena, % 86tik ia % 100 balioa lortuz.



4. irudia. Bizi-zikloko etapa bakoitzaren inpaktuen ehuneko birgaitutako araikinaren inpaktuen murrizketa orokorrekiko.

Azterketa ekonomikoari dagokionez (ikus 4. irudia):

- Kasu bakar batean izan ezik, garraio (A4) eta deuseztapen (C1-4) etapen eragina % 1 baino txikiagoa izango da aztertutako birgaitze-estrategia guztietan.
- Ekoizpen-etaparen (A1-3) eragina % 30 izatera irits daiteke.
- Eraikuntza-prozesuaren (A5) inpaktua ere asko handitzen da, % 9 inguruko balioak lortuz.
- Mantentze-etapa (B2) ere % 10 inguruko balioetara iristen da.
- Azkenik, erabilera-etapan (B6) murrizturiko inpaktuari dagokionez, emaitzek adierazten dute bere ehuneko balorea % 45en eta % 93ren artean aurkitzen dela.

6. SENTSIBILITATE ANALISIA

Hasiera batean, emaitza horietan oinarrituta, ebaluazio-sistemaren irismenaren optimizazioa proposatzeko aukera egongo litzateke. Hala ere, kalkulu horien emaitzetan eta ondorioen irakurketan eragin zuzena duten hainbat alda-

Bizi-ziklo analisiaren irismenaren optimizazioa eraikinen birgaitze energetikoen ingurumen- eta ekonomia-analisietan

gai aurkitzen dira (ikus 7. taula): eraikinaren erabilera-bizitza (EEB), material bakoitzaren aurreikusitako erabilera-bizitza (AEB), materialen garraiatze-distantzia (D), baldintza klimatikoak (BK), barne-energiaren kalkulu-metodologiak (BE), erabilera-etapan zeharreko aldaketak (EEA), konbertsio-faktoreak (KF), energiaren prezioaren bilakaeraren (EPB) joerak edo inflazio-tasaren (IT) aldaketa, besteak beste. Ondorioz, etxebizitzaren birgaitze energetikoaren ebaluazio-sistemaren irismen optimizatu orokor bat lortzeko asmoz, aldagai berri horiek sortuko dituzten egoera desberdin guztiak definitu eta egoera bakoitzean birgaitze-estrategia guztiak berriaz aztertuko dira, estrategia bakoitzak bizi-zikloko etapa bakoitzean izango duen ingurumen- eta ekonomia-inpaktua zenbatu eta ehuneko balorea zehaztuz. Kasu honetan, bizi-ziklo bakoitzeko 775 ingurumen eta 682 ekonomia analisi egingo direlarik.

7. taula. Hasierako hipotesiak (0 egoera) eta aldaketak (egoera berriak) sentsibilitate-analisirako.

	Unitatea	0. egoera	1. egoera	2. egoera	3. egoera
EEB _b	Urtea	50	100	25	—
AEB _m	Urtea	[61,62]	Erdia	50	—
D _m	km	Azterketa kasua	50	300	1.000
BK	—	Donostia	Palermo	Oslo	—
BE _m	—	Prozesu	Hibridoa [37, 71]		—
EEA	—	Azterketa kasua	% -20 [72, 73]	% +20 [72, 73]	—
KF _{elektrizitatea}	MJ/MJ	1,74	% -20	% +20	—
EPB _{elektrizitatea}	%	4	0	8	—
EPB _{gas naturala}	%	3	0	6	—
IT	%	1,5	0	3	—

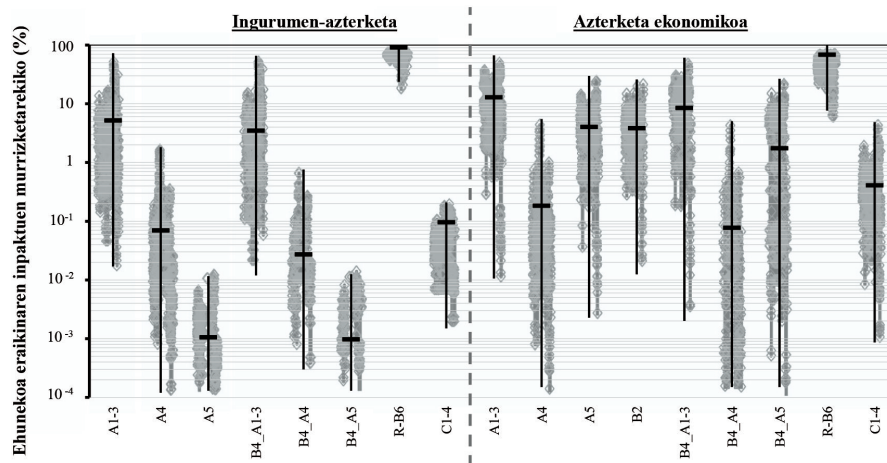
Azkenik, egoera potentzial berriak aztertzeko, 7. taulan definituriko aldagai desberdinen arteko konbinazioaren ondorioz, 8 birgaitze-agertoki berri garatu dira (ikus 8. taula).

8. taula. Birgaitze-konbinazio (K) berriak.

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈
EEB _b	100	100	25	25	100	100	25	25
AEB _m	Erdia	Erdia	50	50	Erdia	Erdia	50	50
BK	Palermo	Palermo	Palermo	Palermo	Oslo	Oslo	Oslo	Oslo
BE _m	Hibridoa (H)	Prozesua (P)	H	P	H	P	H	P
EEA	% -20	% -20	% -20	% -20	% +20	% +20	% +20	% +20
KF _{elektrizitatea}	% -20	% -20	% -20	% -20	% +20	% +20	% +20	% +20
EPB _{elektrizitatea}	% 0	% 0	% 0	% 0	% 8	% 8	% 8	% 8
EPB _{gas naturala}	% 0	% 0	% 0	% 0	% 6	% 6	% 6	% 6
IT	% 0	% 0	% 0	% 0	% 3	% 3	% 3	% 3

6.1. Sentsibilitate-analisiaren emaitzak

Aurreko ataletan azaldu den metodologian oinarriturik, ondorengo 5. irudiak 775 ingurumen eta 682 ekonomia egoeren emaitzak erakusten ditu.



5. irudia. Bizi-zikloko etapa bakoitzarekiko inpaktu globalaren ehuneko sentsibilitate-analitik sortutako egoera guztientzat.

Sailkatze honetan oinarriturik, emaitzen lehen irakurketak erakusten du aztertutako 775 egoeretatik 765 ingurumen-azterketetan, garraio (A4), eraikuntza-prozesu (A5) eta deuseztapen (C1-4) etapen inpaktu-murrizketa orokorrarekiko balioa % 1 baino txikiagoa dela. Analisi ekonomikoari dagokionez, 682 egoeretatik 660 ekonomia-azterketetan, garraio (A4) eta deuseztapen (C1-4) etapen inpaktu-murrizketa orokorrarekiko balioak ere % 1 baino txikiagoak dira, eta kasu guztietan % 5 baino txikiagoak. Bizi-zikloko beste etapei dagokienez, azterlan honetan bi birgaitze talde edo agertoki erabat desberdin finkatu dira. Batetik, arrazoi desberdinen ondorioz (eraikinaren kokapena edo erabilera-bizitza adibidez) birgaitze-estrategiak aplikatu ondoren, eraikinaren erabilera-etaparen inpaktuaren murrizketa bizi-zikloan zehar txikia den egoerak aurkitzen dira. Kasu horietan, erabilera-etapan (B6) zehar murrizturiko inpaktua zenbatzeaz gain, beharrezkoa izango da bizi-zikloaren beste etapetan sortutako inpaktuak ebaluatzea. Bestalde, birgaitze-estrategiak aplikatu ondoren, eraikinaren erabilera-etaparen inpaktuaren murrizketa handia den egoeretan, guztiz bestelako emaitza islatzen da. 573 ingurumen eta 126 ekonomi egoeretan, bizi-ziklo osoan zehar murrizturiko inpaktuarekiko erabilera-etaparen (B6) ehuneko balorea % 90 baino handiagoa izango da. Ondorioz, bizi-zikloko beste

etapa guztiek birgaitzearen ingurumen- eta ekonomia-analisan % 10eko eragin zuzena baino txikiagoa izango dute.

7. ONDORIOAK

Artikulu honek etxebizitza-blokeen birgaitze energetikoko proiektuetan bizi-zikloaren etapa bakoitzaren eta birgaituriko eraikinak bere bizi-ziklo osoan zehar erdietsiriko inpaktu-murrizketa orokorraren arteko erlazioa landu du. Lanean zehar lorturiko emaitzen ondorioz ikus daiteke nola oso zaila den bizi-zikloko metodologiaren bidez lorturiko emaitzen zehaztasunaren eta metodologia horren erabileraren zailtasunaren arteko harremana definituko duen emaitza bakar bat lortzea. Hau da, eraikinen birgaitze energetikoen ingurumen- eta ekonomia-analisietan bizi-ziklo analisiaren irismen optimo bakar bat zehaztea ezinezkoa da, kasu bakoitzean hainbat aldaigai eragin zuzena baitute sinplifikazio horretan.

Ugariak dira erabakiak hartzeko prozesuan bizi-zikloaren zenbait etapa kontuan hartzeko beharra islatzen duten emaitzak. Esate baterako, klima epeletan kokatuta dauden eraikinetan, metodologia hau ezarri eta erabilera-etapaz gain, bizi-zikloko beste zenbait etapa ere aztertzeko beharra azpimarratu da. Bestalde, eskualde klimatiko hotzetan edo eraikinaren erabilera-etapan zehar inpaktuaren murrizketa handia duten eskualdeetan kokatutako eraikinetako emaitzek frogatzen dute metodologia konplexu hau aplikatzeak ez diela zehaztasun handiagorik ematen azken emaitzei. Hau da, birgaitze-estrategia bat aztertzerakoan, egoera horietan eraikinaren erabilera-etapa bakarrik aztertuta nahikoa izango litzateke, bizi-zikloko beste etapen inpaktu zuzena eraikinaren inpaktu osoarekiko oso txikia baita.

Horregatik guztiarengatik, beharrezkoa izango da birgaitze-estrategien inpaktuak aztertzerakoan, estrategia jakin bat lehenesteko garaian, birgaitze-politikak zehazterakoan edo energia-portaeraren ziurtagiri berrien irismena definitzerakoan, baldintza klimatiko eta eraikin-parkearen prestazio termikoen arabera herrialde edo gune geografiko bakoitzean bizi-ziklo metodologian oinarritzen den ebaluazio-sistemaren irismen optimizatu bat zehaztea.

ESKER ONAK

Artikulu hau Eusko Jaurlaritzaren laguntzarekin garatu da, Hezkuntza, Hizkuntza Politika eta Kultura Sailaren Doktore Aurreko Programaren bidez (BFI-2011-92).

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] IEA (2013). International Energy Agency (IEA). *CO₂ emissions from fuel combustion Highlights*; Paris, France, 2013; pp. 600.
- [2] Power, A. (2008). Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability? *Energy Policy*, **36** (12), 4487-4501.
- [3] CEC (2014a). European Commission. *Resource efficiency opportunities in the building sector*. COM (2014) 445 final. Brussels, 1.7.2014.
- [4] CEC (2014b). European Commission. *Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy*. COM (2014) 520 final. Brussels, 23.7.2014.
- [5] Hernandez, P., Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). *Energy Build.*, **42**, 815-821.
- [6] ISO, International Standardization Organization (1997). *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. ISO 14040:1997.
- [7] ISO, International Standardization Organization (1998). *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. ISO 14044:2006.
- [8] CEN TC 350. European Committee for Standardization, Technical Committees. *Sustainability of construction works*.
- [9] ISO, International Standardization Organization. *Sustainability in buildings and civil engineering works*. ISO TC 59/SC17.
- [10] EN 15978 (2011). *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*. 2011.
- [11] Zabalza, I., Aranda, A., Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Build. Environ.*, **44**, 2510-2520.
- [12] Blom, I., Itard, L., Meijer, A. (2010). Environmental impact of dwellings in use: Maintenance of façade components. *Build. Environ.*, **45**, 2526-2538.
- [13] Blengini, G.A. (2009). Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: a case study in Turin-Italy. *Build. Environ.*, **44**:319-30.
- [14] Gustavsson, L., Joelsson, A. (2010). Life cycle primary energy analysis of residential buildings. *Energy Build.*, **42**, 210-220.
- [15] Ortiz, O., Castells, F., Sonnemann, G. (2010). Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. *Sci. Total Environ.*, **408**, 2435-2443.
- [16] Doodoo, A., Gustavsson, L., Sathre, R. (2010). Life cycle primary energy implication of retrofitting a wood-framed apartment building to passive house standard. *Resour. Conserv. Recycl.*, **54**, 1152-1160.
- [17] Malmqvist, T., Galumann, M., Scarpellini, S., Zabalza, I., Aranada, A., Llera, E., Diaz, S. (2011). Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. *Energy*, **36**, 1900-1907.

- [18] Tae, S., Shin, S., Kim, H., Ha, S., Lee, J., Han, S. (2011). Life cycle environmental loads and economic efficiencies of apartment buildings built with plaster board drywall. *Renew Sustain Energy Rev*, **15**:4145-55.
- [19] Wallhagen, M., Glaumann, M., Malmqvist, T. (2011). Basic building life cycle calculations to decrease contribution to climate change – case study on an office building in Sweden. *Build. Environ.*, **46**:1863-71.
- [20] Rossi, B., Marique, A.-F., Glaumann, M., Reiter, S. (2012). Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Build. Environ.*, **51**:395-401.
- [21] Sharma, A., Shree, V., Nautiyal, H. (2012). Life cycle environmental assessment of an educational building in Northern India: A case study. *Sustainable Cities and Society*, **4**:22-8.
- [22] Gazulla, C., Oregi, X. (2012). *EeBGuide Background Report for Buildings*. LCA of the building Amara (Donostia, Spain).
- [23] Iyer, U., Wong, J.P.C. (2012). Evaluation of whole life cycle assessment for heritage buildings in Australia. *Build. Environ.*, **47**:138-49.
- [24] Stephan, A., Crawford, R.H., Myttenaere, K. (2012). Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings. *Energy Build.*, **55**, 592-600.
- [25] Cuéllar, R.M., Azapagic, A. (2012). Environmental impacts of the UK residential sector: life cycle assessment of houses. *Build. Environ.*, **54**:86-99.
- [26] Ramesh, T., Prakash, R., Shukla, K.K. (2012). Life cycle energy analysis of a residential building with different envelopes and climates in Indian context. *Appl. Energy*, **89**, 193-202.
- [27] Stephan, A., Crawford, R.H., Myttenaere, K. (2013) A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses. *Appl. Energy*, **112**, 23-34.
- [28] Asdrubali, F., Baldassarri, C., Fthenakis, V. (2013). Life cycle analysis in the construction sector: guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy Build.*; **64**:73-89.
- [29] Allacker, K., De Troyer, F. (2013). Moving towards a more sustainable Belgian dwelling stock: the passive standard as the next step? *Journal of Green Building*, **8**(2): 112-132.
- [30] Paulsen, J.S., Sposto, R.M. (2013). A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: case study for the program «MY HOUSE MY LIFE». *Energy Build.*, **57**:95-102.
- [31] Vrijders, J., Wastiels, L. (2013). Nearly Zero Energy Renovation of houses: Life cycle costs and environmental impact. *International Sustainable Building Conference*, Graz. 87-94.
- [32] De Angelis, E., Dotelli, G., Pittau, F., La Torre, A., Porcino, C., Pansa, G., Villa, N. (2013). LCA and LCC based Energy Optimization of Building Renovation Strategies. *International Sustainable Building Conference*, Graz. 77-86.
- [33] Ostermeyer, Y., Wallbaum, H., Reuter, F. (2013). Multidimensional Pareto optimization as an approach for site-specific building refurbishment solu-

- tions applicable for life cycle sustainability assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **18**(9): 1762-1779.
- [34] Mosteiro, M., Krogmann, U., Wallbaum, H., Ostermeyer, Y., Senick, J.S., Andrews, C.J. (2014). Relative importance of electricity sources and construction practices in residential buildings: A Swiss-US comparison of energy related life-cycle impacts. *Energy Build.*, **68**, 620-631.
- [35] Bull, J., Gupta, A., Mumovic, D., Kimpian, J. (2014). Life cycle cost and carbon footprint of energy efficient refurbishments to 20th century UK school buildings. *Int J Sustain Build. Environ.*, **3**:1-17.
- [36] Doodoo, A., Gustavsson, L., Sathre, R. (2014). Lifecycle primary energy analysis of low-energy timber building systems for multi-storey residential buildings. *Energy Build.*, **81**, 84-97.
- [37] Stephan, A., Stephan, L. (2014). Reducing the total life cycle energy demand of recent residential buildings in Lebanon. *Energy*, **74**:618-37.
- [38] Russell-Smith, S.V., Lepech, M.D., Fruchter, R., Meyer, Y.B. (2014). Sustainable target value design: integrating life cycle assessment and target value design to improve building energy and environmental performance. *J Clean Prod.*, **88**, 43-51.
- [39] Rodriguez, C., Freire, F. (2014). Integrated life-cycle assessment and thermal dynamic simulation of alternative scenarios for the roof retrofit of a house. *Build. Environ.*, **81**:204-15.
- [40] Bastos, J., Batterman, S.A., Freire, F. (2014). Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of three building types in a residential area in Lisbon. *Energy Build*, **69**:344-53.
- [41] Devi, L.P., Palaniappan, S. (2014). A case study on life cycle energy use of residential building in Southern India. *Energy Build.*, **80**:247-59.
- [42] Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., Mistretta, M. (2014). Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: operation and embodied energy of an Italian case study. *Energy Build.*, **72**:371-381.
- [43] Assiego de Larriva, R., Calleja, G., Cejudo, J.M., Raugei, M., Fullana, P. (2014). A decision-making LCA for energy refurbishment of buildings: conditions of comfort. *Energy Build.*, **70**:333-42.
- [44] Cetiner, I., Edis, E. (2014). An environmental and economic sustainability assessment method for the retrofitting of residential buildings. *Energy Build.*, **74**: 132-140.
- [45] Oregi, X., Hernandez, P., Gazulla, C., Isasa, M. (2015). Integrating Simplified and Full Life Cycle Approaches in Decision Making for Building Energy Refurbishment: Benefits and Barriers. *Buildings*, **5**(2), 354-380.
- [46] EN 16627:2015 (2015). *Sustainability of Construction Works - Assessment economic performance of buildings – Calculation methods*.
- [47] Ecoinvent Centre (2014). Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, Suiza.
- [48] GaBi (2014). Product sustainability performance solutions by PE Europe GmbH and IKP University of Stuttgart.

- [49] Saint-Gobain Glass, Declaration Environnementale et Sanitarie. SGG CLIMAPLUS. AFNOR Registrierungsnummer N.º 08-257:2011.
- [50] Saint-Gobain Glass, Declaration Environnementale et Sanitarie SGG CLIMATOP AFNOR: 08-259:2011.
- [51] Institut Bauen und Umwelt (IBU) e.V. FPX - Fachvereinigung Polystyrol-Extruderschäumstoff, 2014. EPD-FPX-20140156-IBE1-DE.
- [52] Institut Bauen und Umwelt (IBU) e.V. GUTEX Holzfaserplattenwerk H, 2015. Henselmann GmbH + Co KG. EPD-GTX-20140222-IBC2-DE.
- [53] Verband der Fenster- und Fassadenhersteller e.V. & Bundesverband Flachglas e.V.: *In neuem Licht. Energetische Modernisierung von alten Fenstern*. VFF & BF, Frankfurt a.M./Troisdorf, 2014.
- [54] *Economic of deep renovation; Implications of a Set of Case Studies*, 2010. ECOFYS and EURIMA, 2010 Available online: http://www.eurima.org/uploads/ModuleXtender/Publications/51/Economics_of_Deep_Renovation_Ecofys_IX_Study_Design_FINAL_01_02_2011_Web_VERSION.pdf (2017ko otsaila).
- [55] Generador de Precios, España. CYPE Ingenieros. Available online: <http://www.generadordeprecios.info/> (2017ko otsaila).
- [56] *Solar district heating guidelines*, 2012. Available online: http://solar-district-heating.eu/Portals/0/Factsheets/SDH-WP3-D31-D32_August2012.pdf (2017ko otsaila).
- [57] Smestad, G.P. The Basic Economics of Photovoltaics, 2008. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, P.O. Box 5729, San José, California 95150-5729, U.S.A.
- [58] Lasvaux, S. (2010). *Study of a simplified model for the Life Cycle Assessment of buildings*, PhD thesis, MINES ParisTech.
- [59] Economic data base Presto. Available online at: <http://www.acae.es/> (2017ko otsaila).
- [60] Global Rates. Available online: <http://es.global-rates.com/estadisticas-economicas/inflacion/indice-de-precios-al-consumo/ipca/ipca.aspx> (2017ko otsaila).
- [61] National association of Home Builders (NAHB) & and Bank of America. *Study of Life Expectancy of Home Materials*, edited by J. Jackson, 1-15. Washington, 2007.
- [62] Fthenakis, V., Kim, H.C., Held, M., Raugei, M., Krones, J. (2009). *Update of PV energy payback times and life-cycle greenhouse gas emissions*, in 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Hamburg, Germany.
- [63] Spanish Technical Building Code, CTE, 2013. Available online: <http://www.codigotecnico.org/> (2017ko otsaila).
- [64] Design Builder Simulation Tool. Available online: <http://www.design-builder.es> (2017ko otsaila).
- [65] Red Electrica de España. Availabale online: <http://www.ree.es/en> (2017ko otsaila).

- [66] Eurostat. Electricity and natural gas price statistics, 2014. Online data code: nrg_pc_202 and rg_pc_204 (2017ko otsaila).
- [67] E-Control & VaasaETT. *Household Energy Price Index for Europe*, 2015.
- [68] Boverket & MMR. National Board of Housing, Building and Planning, Sweden & Ministry for Regional Development of the Czech Republic (Ed.), *Housing Statistics in the European Union 2004*.
- [69] Ramesh, T., Prakash, R., Shukla, K.K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy Build.*, **42**, 1592-1600.
- [70] Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V. (2011). Life cycle assessment of buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **15**, 871-875.
- [71] Crawford, R.H. (2008). Validation of a hybrid life-cycle inventory analysis method. *J. Environ. Manag.*, **88**, 496-506.
- [72] Pettersen, T.D. (1994). Variation of energy consumption in dwellings due to climate, building and inhabitants. *Energy Build.*, **21**, 3, 209-218.
- [73] Juodis, E., Jaraminiene, E, Dudkiewicz, E. (2009). Inherent variability of heat consumption in residential buildings. *Energy Build.*, **41**(11):1188-1194.