

Instalazio termiko hibrido baten energia- eta exergia-analisi dinamikoa

(Dynamic energy and exergy analysis applied to a hybrid thermal facility)

Arrate Hernández-Arizaga*, Ana Picallo-Pérez, José María Sala-Lizarraga

ENEDI Ikerketa Taldea. Ingeniaritza Energetiko Saila.
Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

LABURPENA: Klima-aldaketaren eraginez, tokian tokiko energia-eskaria aldatzen ari da. Horrek energia-eskaria asetzeko sistemen dimentsionamenduan eta operazio-moduan eragiten du; batez ere, epe luzerako proiektatzen diren sistemetan. Hala, premiazkoa da jatorri berriztagarria duten energia-iturriak ezagutzea, modu jasangarrian ustiatzea eta ustiaketa klima-aldaketaren eskakizunetara egokitu diren sistemekin egitea. Bero-ponpak bi baldintza horiek bateratzen ditu. Bero-ponpa inguru-tenperaturatik gertu dauden energia-iturriak ustiatzeko gai da eta eskakizun termiko baxua duten aplikazioen energia-beharrak asetzeko aproposa den teknologia da. Eraikinen energia-eskaria handia da, baina eraikinetarako ur bero sanitarioak eta berokuntzak eskakizun termiko baxua dute. Horrela, eraikinen instalazio termikoetan bero-ponpa edukitzeak, energia-trantsizioa eta klima-aldaketaren agertoki berrira egokitzeko malgutasuna bermatzen ditu. Energia-eskaria ahalik eta gehien murrizteko, energia-baliabideen degradatze-mekanismoak ezagutu behar dira. Energia- eta exergia-analisiak oso tresna erabilgarriak dira sistema baten exergia-suntsiketa eta energia- eta exergia-efizientzia ezagutzeko. Lan honetan, sorkuntza-sisteman lurzorura akoplatutako bero-ponpa bat eta gas-galdara bat dauzkan instalazio hibrido errealek aurkezten da. Instalazioak ur bero sanitarioz eta berokuntzaz hornitzen du eraikin bat. TRNSYS softwarearen bitartez, instalazioaren simulazio dinamikoa burutu da eta energia- eta exergia-analisia aplikatzeko datuak lortu dira. Lehen aldiz, exergia-analisi dinamikoa aplikatu da. Lortutako emaitzen arabera, exergia-suntsiketaren % 78 galdaran gertatzen da, eta bero-ponparen exergia-efizientzia % 46koa da. Lortutako emaitzek zabaldu egiten dute instalazio termiko honen energia-portaera hobetzeko bidea.

HITZ GAKOAK: bero-ponpa, efizientzia, energia-analisia, exergia-analisia, TRNSYS.

ABSTRACT: Climate change is modifying the energy demand everywhere. This influences the way in which energy demand supply systems are sized and how they work, especially in systems designed for the long term. Thus, it is urgent to know the sources of renewable energy to exploit them in a sustainable way and to do so with systems that adapt their exploitation to the requirements of climate change. The system that mixes these two requirements is the heat pump. The heat pump is capable of exploiting energy sources close to the surrounding temperature and is an ideal technology for meeting the energy needs of applications with low thermal requirements. The energy demand of buildings is high, but domestic hot water for buildings and heating have a low thermal demand. Thus, the use of heat pumps in the thermal facilities of buildings ensures the energy transition and the flexibility to adapt to the new climate change scenario. In order to reduce energy demand as much as possible, it is necessary to know the degradation mechanisms of energy resources. Energy and exergy analyses are very useful tools to know the exergy destruction and the energy and exergy efficiency of a system. This paper presents a real hybrid facility containing in the generation block a ground-coupled heat pump and a gas boiler. The facility supplies a building with domestic hot water and heating. The dynamic simulation of the facility has been carried out with TRNSYS software and data for the application of energy and exergy analysis have been obtained. For the first time, a dynamic exergy analysis has been applied to a system consisting of a ground source heat pump and a gas boiler. The results obtained indicate that 78% of the exergy destruction occurs in the boiler and the exergy efficiency of the heat pump is 46%. The results obtained allow to improve the energy performance of this thermal facility.

KEYWORDS: heat pump, efficiency, energy-analysis, exergy-analysis, TRNSYS.

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Arrate Hernández-Arizaga. Research group ENEDI, Department of Energy Engineering, University of the Basque Country (UPV/EHU); Plaza Ingeniero Torres Quevedo n.º 1 (48013 Bilbao, Bizkaia). – arrate.hernandez@ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0001-5944-5109>.

Nola aipatu / How to cite: Hernández-Arizaga, Arrate; Picallo-Pérez, Ana; Sala-Lizarraga, José María (2022). «Instalazio termiko hibrido baten energia- eta exergia-analisi dinamikoa»; *Ekaia*, ale berezia 2022, 131-149. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.23091>).

Jasotze-data: 2021, irailak 30; Onartze-data: 2021, abenduak 28

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2022 UPV/EHU



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-LanEratorririkGabe 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

70eko hamarkadako petrolio-eskasiaren krisiak energia-eredu berri baten beharra utzi zuen agerian. Erregai fosiletan oinarritutako ordura arteko energia-eredua kolokan jarri zen, eta energia-iturri berriztagarrietan, jasangarritasunean eta efizientzian oinarritutako energia-eredu bat aurkeztu zen. XXI. mendearen hasieran, energia-eredu berriak behin betiko bultzada izan zuen, onartu baitzen klima-aldaketa eragiten zutela giza jarduerak atmosferara isuritako berotegi-efektuko gasek; besteak beste, karbono dioxidoak (CO_2), metanoak (CH_4) eta nitrogeno oxidoak (NO_x).

Europar, 2018. urteko datuen arabera [1], eraikinek kontsumitzen dute energia-eskariaren % 40a eta igortzen dute CO_2 isuriaren % 15a. Herrialde garatuak helburuetako bat eraikinen energia-eskaria murriztea da. Europar, (EU) 2018/844 Zuzentarauak [2] arautzen du eraikinen energia-eredu berria, eta energia berriztagarriak erabiltzen dituzten sistemak instalatzera bultzatzen du. Garapen-bidean dauden herrialdeetan, aldiz, ekonomia, urbanizazioa eta biztanleria gora egiten ari direnez, eraikinen erabiltzaileen bizi-kalitatea handituz doa, eta konfort termikoaren eskaria areagotuz. Hori dela eta, eraikinen energia-eskaria handitu egingo dela aurreikusten da [3].

Eraikin-sistemek bi energia-eskari asetzen dituzte: elektrizitatea eta beroa. Energia-eskaria elementu pasiboekin edo aktiboekin ase daiteke [4]. Elementu pasiboek ez dute energiari kontsumitzen; aktiboek bai, ordea. Gailu mekanikoz eta elektrikoak osatzen dira; instalazio termikoetan daude, eta horien helburua eraikina berotzea, aireztatzea, airea egokitzea, hoztea eta ur bero sanitarioa (UBS) ekoiztea da. Espainian, esaterako, 2010-2019 arteko energia-kontsumoari buruzko datuen arabera, bizitegi-sektoreko eraikinen energia-kontsumoaren % 61,8ren erantzule dira [5]: energia-kontsumoaren % 42,6a berokuntzari dagokio, % 18,2a UBSri eta ia % 1a aire girotuari.

Eraikinaren energia-eskariak energia-kontsumoa eragiten duenez [6], inguratzaile egokia eta elementu pasiboak behar dira [7]. Gainera, klima-alaketak eragina du eraikinen energia-eskarian: klima hotzetan, berokuntza-eskaria jaitsi egin da, eta klima beroetan, aldiz, igo egin da hotz-eskaria [8]. Europar, klima hotza eta epela direnez nagusi, eraikinen kontsumo gehiena berokuntzarako erabiltzen da [9]. Energia-eskaria aldatzean, instalazio termikoen jarrera ere aldatu egin da [10], bai eta instalazioen bidegarritasuna ere [11].

Klima-alaketaren eraginak ziurgabetasuna eranstean duenez energia-eskarian, analisi holistikoa behar da sistema egokiena aukeratzeko [6]; bestalde, sistema malguak behar dira energia berriztagarriak ustiatzeko [12]. Sistema malguen adibide bat bero-ponpa da, elementu moldakorrek dauz-

kalako [13]. Lurzorura akoplatutako bero-ponpek lurraren gainazaleko energia geotermikoa [14] ustiatzen dute. 25-30 °C-tik beherako tenperaturako baliabide geotermikoa da oso tenperatura baxuko edo oso entalpia baxuko energia termikoa. Baliabide hori lurrazpiko uretan eta sakonera gutxiko lurpean biltegitratuta dago lurrazal osoan [15], eta bero-ponpaz soilik ustia daiteke urtearen 365 egunez eta 24 orduz. [16], [17] eta [18] lanetan deskribatzen dira lurzorura akoplatutako bero-ponpa motak, ezaugarri teknikoak eta aplikazioak.

Bero-ponpekin, bizitegi-etxe txikien, eraikin indibidualen edota konplexuen (bulego, hotel, eskola eta merkataritza-guneen) berokuntza-, hozte- eta UBS-sistemak elikatzen dira [4]. Ponpa batzuek beroa edota hotza bakarrik ematen dute; beste batzuek, ordea, bi eskariak batera ematen dituzte. Bero-ponpak UBS ekoizten badu eta UBS metatzeko depositu bat badago, 60 °C-ko tenperatura bermatu beharko da banaketaren aurretik (legionelosisa saihesteko eta kontrolatzeko), higie- eta osasun-irizpideak betez [19]. Bero-ponpak ez badu aipatutako tenperaturara iristeko ahalmena, beste sistema batekin lotu ahal izango da, gas-galdara batekin adibidez, sistema hibrido bat sortuz. Bero-ponpen sistema hibrido ugari daude, eta horiek ezartzeko irizpideak eta helburuak askotarikoak dira [20].

Arautegiari dagokionez, batetik, Eraikingintzaren Kode Teknikoak UBS ekoizteko gutxieneko ekarpen berriztagarria ezartzen du; bestetik, bero-ponpen energia-ekarpenaren jatorri berriztagarria kalkulatzeko, Europako Batzordearen 2013/114/EB Erabakiari [21] jarraitu behar zaio.

1.1. Exergia eraikinetan

Energia-eskaria ahalik eta gehien murrizteko, energia-baliabideen degradatze-mekanismoak ezagutu behar dira. Horretarako, ezinbestekoa da energia- eta exergia-analisi baten bitartez energia-potentziala aztertzea [22].

Energia-analisia sistemaren energia-efizientzia kalkulatzeko erabiltzen da, eta Termodinamikaren lehenengo printzipioan oinarritzen da. Printzipio horren arabera, prozesu termodinamikoaren bitartez, energia formaz aldatzen da eta energia kopurua kontserbatu egiten da.

Exergia-analisia termodinamikaren bigarren printzipioan oinarritzen da, eta fluxuak exergia-aldagai termodinamikoaren bitartez ezaugarritzen dira [23]. Exergia da energia-fluxu batek lan erabilgarria sortzeko duen potentziala; alegia, fluxuaren energia-kalitatea. Bigarren printzipioaren arabera, prozesu termodinamikoetan suntsitu egiten da exergia. Exergia-analisiaren helburu dira exergia-suntsiketa kokatzea, kuantifikatzea eta jatorria argitzea [24].

Etxebizitzen exergia-mailak oso baxuak dira, UBSren eta eraikuntzen konfort-tenperaturak hurbil daudelako giro-tenperaturatik; orobat, eraikinen giro-tenperatura «egoera hiltzat» hartzen da [25]. Beraz, eraikin baten eskari termikoa asetzeko behar den energia-fluxuen kalitatea baxua da, eta hildako egoeratik gertu dauden energia-iturriekin bete daiteke, hala nola oso entalpia baxuko energia geotermikoarekin. Ildo horri jarraituz, LowEx deitzen zaie exergia-kontsumo baxuko edo energia-kalitate baxuko eraikinei.

Exergia-analisia eraikinetan barneratzeko, oso garrantzitsuak izan dira Energiaren Nazioarteko Agentziak (IEA) abiarazitako bi proiektu: *EBC ANNEX 37 Low Exergy Systems for Heating and Cooling* [26] eta *EBC ANNEX 49 Low Exergy Systems for High Performance Building and Communities* [27].

Atal honetan egindako sarreraren ondoren, 2. atalean arloko egoera deskribatzen da, eta ikerketa-lanaren helburua definitzen. 3. atalean, ikerketaren muina aurkezten da. 4. atalean, lorturiko emaitzak erakusten dira, eta 5. atalean ondorioak aurkezten.

2. ARLOKO EGOERA ETA HELBURUA

Exergia-analisia 1965ean aplikatu zen lehen aldiz industrian potentzia-instalazio batean [28]. XX. mendeko 90eko hamarkadaren hasieran hasi zen eraikuntzetan aplikatzen [29, 30]. Instalazio industrialek ez bezala, eraikuntzen instalazio termikoek izaera dinamikoa dute. 2010etik gaur arte, exergia-analisiari buruzko lanak nabarmen ugartu dira. Oso nabarmentzekoa da [31] liburua, non exergia-analisia eta analisi termoekonomikoa eraikuntzen instalazio termikoetan aplikatzeko metodoak erakusten diren, eraikinen eta energiaren beste hainbat alderdiren artean.

Data horretatik aurrera, eraikuntzak eta exergia-analisia oinarritzat duten lanak [32] erreferentzian bateratzen dira. Lan horretan, bi gogoeta azpimarratzen dira: batetik, egoera hilaren definizioa estandarizatzearen beharra, eta, bestetik, exergia-analisi dinamikoak egitearen beharra. Beharrian berdina aipatzen da [33] lanean: eraikinen instalazio termikoan inertzia termiko handia dago, eta, oro har, txikia da instalazioaren tenperaturaren eta giro-tenperaturaren arteko aldea.

Beharrei erantzunez, energia- eta exergia-analisi dinamikoa aplikatzen da [34] lanean, non lurzorura akoplatutako bero-ponpa bat urtebeteko datuekin ikertzen baita. Lortutako emaitzak kontrola optimizatzeko erabiltzen dira [35]. [36] erreferentzian, lurzorura akoplatutako bero-ponpa baten exergia-analisi dinamikoa egiten da, eta errendimendua hobetzeko bost kontrol-estrategia proposatzen dira. Pauso bat haratago ematen da [37]

erreferentzian, non exergia-analisi dinamiko aurreratua (DAEA) aplikatzen baita, lehenengo aldiz, eraikin batean [38] berokuntza eta UBS ekoizteko. Analisiaren helburua hainbat kontrol-estrategia erabiliz erregai-kontsumoa murriztea da.

Azpimarratzeko modukoa da [39] erreferentziako lana: exergia-analisi geldikor bat egiten da, diseinu-baldintzetan, sistema hibrido batean (lurzorura akoplatutako bero-ponpa batek eta gas-galdara batek osatua). Lortutako emaitzak instalazioaren COPa eta exergia-efizientzia kalkulatzeko erabiltzen dira, eta exergia-efizientzia kalkulatzeko adierazleak [40] eta [41] lanetatik ateratzen dira. Ondorioen arabera, beharrezkoa da sistemaren baldintza propioak eta inguru-baldintzen alderdiak ikertzea. Gainera, egoera geldikorra azterketa dinamiko batera egokitu behar dela adierazten da, sistemaren funtzionamendu-baldintza errealeko errendimendua aztertzeko.

Ikerketa honen helburua [39] lanean aipatzen diren gabezia batzuei erantzuna ematea da. Horretarako, sortze-sisteman lurzorura akoplatutako bero-ponpa bat eta gas-galdara bat dituen instalazio termiko erreal bat aukeratu da. Batetik, instalazioa eta instalazioaren kontrola TRNSYS softwarearekin modelatu dira. Bestetik, instalazioaren monitorizazio-sistemaren datu-baseko energia-eskaria hartu da TRNSYS modeloa elikatzeko. Modeloaren simulazio dinamikoa burutu da, eta energia- eta exergia-analisi dinamikoak egiteko datuak lortu dira. Datu horiekin, instalazioko elementuetan ematen den exergia-suntsiketa kalkulatu da, bai eta energia- eta exergia-efizientzia ere.

3. IKERKETAREN MUINA

Atal honetan, lehendabizi instalazio termikoa deskribatzen da; ondoren, simulazioa nola gauzatu den, eta, bukatzeko, aplikaturiko metodologia.

3.1. Instalazioaren deskribapena

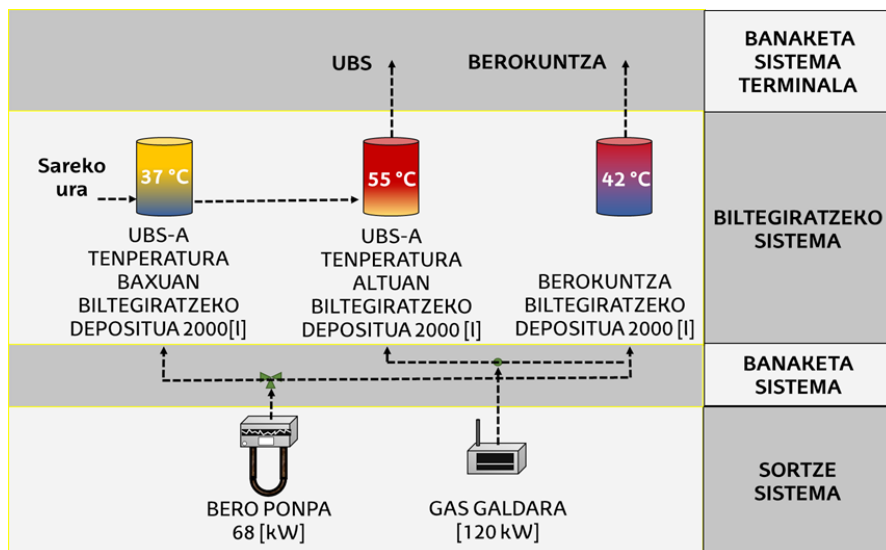
Instalazio termikoak Durangoko (Bizkaia) 26 etxebizitza UBSz eta berokuntzaz hornitzen ditu (ikus 1. irudia).



1. irudia. Instalazioak hornitzen duen eraikina.

Instalazio zentralizatua da eta energia-sorkuntza hibridoa du, energia metatzeko ahalmenarekin: lurzorura akoplatutako bero-ponpa bat, 68 kW-ko potentzia nominalekoa, erregai modura gas naturala erabiltzen duen kondentsazio-galdara bat, 120 kW-ko potentzia nominalekoa, eta 2.000 l-ko hiru depositu dauzka (bi UBS biltegitratzeko eta bat berokuntzarako). 2. irudiak instalazioaren eskema sinplifikatua erakusten du eta ur-biltegien *set-point* tenperaturak adierazten ditu. Ur-biltegien tenperaturak *set-point* tenperaturaren ingurukoak dira beti. *Set-point* tenperaturak instalazioaren kontrol-parametroak dira. Sortze-sistemaren operazioa agintzen dute, ekipok piztuz edota itzalaraziz.

Kontrol- eta erregulazio-sistemak instalazioaren funtzionamendua kontrolatzen du, eta urriaren 15etik maiatzaren 14ra mugatzen du berokuntzaren ekoizpena. Instalazioa SCADA sistema baten bidez monitorizatzen da: 26 termopare, 4 energia-kontagailu (zirkuitu primarioan) eta UBSren eta berokuntzaren kontsumoa neurtzeko kontagailuak daude.



2. irudia. Instalazioaren eskema sinplifikatua.

3.2. Simulazioa

Instalazioaren dokumentazio teknikoan oinarrituta, energia-eredu bat eraiki da TRNSYSen. SCADA sistemak erabiltzaileen UBS- eta berokuntza-kontsumoak biltegitratzen ditu egun bateko maiztasunarekin. 8 egun adierazgarrien erregistroak aukeratu dira TRNSYSen eraikitako ereduak edukiko duen energia-eskaera finkatzeko. Egun adierazgarriak hautatzeko irizpidea [42] lanean azaltzen da.

1. taulan, egun bakoitzari dagokion letra adierazten da, Atik Hra, C31 kodearekin UBS-ekaria eta C32 kodearekin berokuntza.

1. taula. Energia-eskariaren balioak.

Egunak	C31 (m ³)	C32 (kWh)
A	3,1	0,0
B	3,5	0,0
C	3,6	65,8
D	4,2	226,2
E	3,2	42,5
F	3,9	0,0
G	3,6	228,6
H	4,1	368,5

3.3. Metodologia

Metodologia grafo-teorian [43] eta matrize-aljebra [44] oinarritzen da. Beraz, intzidentzia-matritzetik abiatuta, sistemaren egitura fisikoaren adierazpen aljebraikoa egingo da, materiaren eta energia-fluxuen adierazpen bektoriala egiteko; gero, masa-, energia- eta exergia-balantzeak aplikatuko dira, matrize-kalkuluaren bidez.

$A_{(n,m)}$ intzidentzia-matrizea osatzeko, instalazioaren elementu/ekipo kopurua (n) eta fluxu kopurua (m) zehazten dira. Ekipoak eta fluxuak 1, -1 edo 0 zenbakiekin erlazionatzen dira: 1 fluxua ekipo batera sartzen bada, -1 fluxua ekipo batetik irteten bada, eta 0 ez badago fluxuaren eta ekipoen arteko erlaziorik.

Fluxuak masa, entalpia eta exergia espezifiko balioekin ezaugarritzen dira. Hauek dira masa-, energia- eta exergia-balantzeak:

$$A_{(n,m)} \cdot M_{(m,1)} = 0_{(n,1)} \quad (1)$$

$$A_{(n,m)} \cdot H_{(m,1)} = 0_{(n,1)} \quad (2)$$

$$A_{(n,m)} \cdot B_{(m,1)} = 0_{(n,1)} \quad (3)$$

$M_{(m,1)}$ fluxu bakoitzaren masa-unitate bektorea da. $H_{(m,1)}$ fluxu bakoitzaren entalpia-unitate bektorea da. $B_{(m,1)}$ fluxu bakoitzaren exergia-unitate bektorea da. $D_{(n,1)}$ exergia-suntsiketa unitate bektorea da. $D_{(n,1)}$ bektoreak analisisian kontsideratutako ekipo bakoitzean ematen den exergia-suntsiketa adierazten du.

Ekipoen energia-efizientzia (η) eta exergia-efizientzia (φ) adierazleak kalkulatzeko fluxuak baliabideetan (F) eta produktuetan (P) sailkatzen dira:

$$\eta = \frac{P_e}{F_e} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{P_{ex}}{F_{ex}} \quad (5)$$

P_e produktuaren eta F_e fuelaren energia-balioak dira, eta P_{ex} produktuaren eta F_{ex} fuelaren exergia-balioak.

Bero-ponparen energia-efizientziaren eta exergia-efizientziaren adierazleak urtaroko erabilpen-faktorea (*seasonal performance factor*, SPF) eta urtaroko erabilpen-faktorea exergia-unitateetan (*seasonal exergy performance factor*, SxPF) dira [31]:

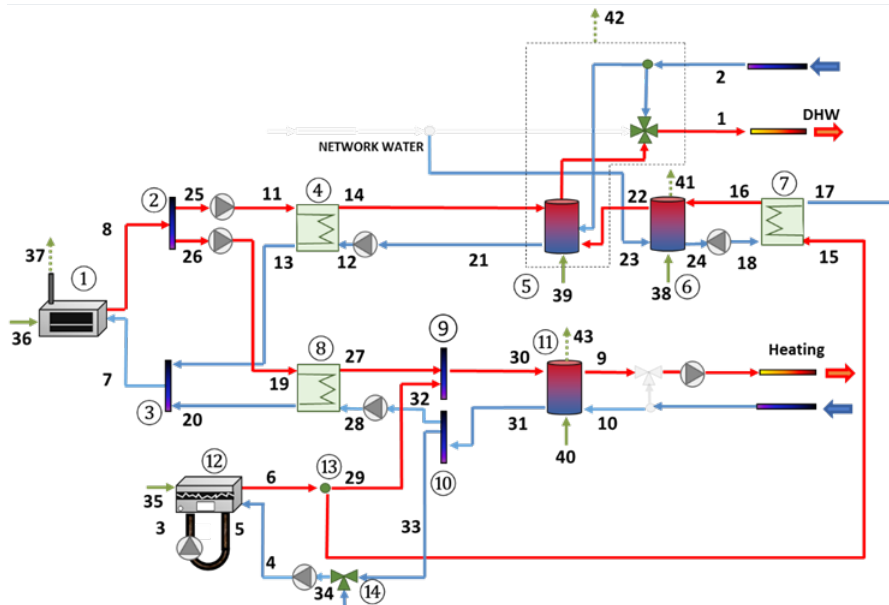
$$SPF = \frac{P_e}{F_e} \quad (6)$$

$$SxPF = \frac{P_{ex}}{F_{ex}} \quad (7)$$

P_e produktua eta F_e fuelaren energia-balioak dira, eta P_{ex} produktua eta F_{ex} fuelaren exergia-balioak.

3.4. Instalazioaren egitura fisikoa eta intzidentzia-matrizea

Energia- eta exergia-analisirako erabiliko diren ekipoen eta fluxuen 3. irudian daude jasota, eta ekipoei dagokien deskripzio laburra 2. taulan dago adierazita.



3. irudia. Ekipoen eta fluxuen numerazioa.

2. taula. Zenbatutako ekipoei emandako sinboloa eta deskripzio laburra

Instalazioaren elementu nagusiak		
Zk.	Sinboloa	Deskripzioa
1	B	Gas-galdara
2	D1	UBS eta berokuntza banaketa-kolektorea
3	M1	UBS eta berokuntza nahasketa-kolektorea
4	HX1	Bero-trukatzailea
5	ST1 + V4V	Tenperatura altuko UBS biltegia eta V4V balbula
6	ST2	Tenperatura baxuko UBS biltegia
7	HX2	Bero-trukatzailea
8	HX3	Bero-trukatzailea
9	M2	Berokuntza nahasketa-kolektorea
10	D2	Berokuntza banaketa-kolektorea
11	ST3	Berokuntza-biltegia
12	GSHP	Lurzorura akoplatutako bero-ponpa
13	D3	UBS eta berokuntza banaketa-kolektorea
14	V3V	UBS eta berokuntzarako hiru bideko balbula

Intzidentzia-matrizearen dimentsioak 3. taulan definitzen dira, n eta m balioekin.

3. taula. n eta m balioak

n	14
m	43

4. irudiak intzidentzia-matrizea erakusten du, non ekipoen eta fluxuen arteko erlazioak 1, -1 eta 0 zenbakiekin adierazten diren.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43				
1	1																																														
2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3																																															
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5																																															
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0		
7																																															
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9																																															
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
11																																															
12	0	0	1	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13																																															
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

4. irudia. Intzidentzia-matrizea.

3.5. Masa-, energia- eta exergia-balioak

TRNSYSen instalazioan 8 egunetako 192 orduen simulazio dinamikoa egin da, 0,01 orduko (36 segundo) *time-step*-arekin. *Time-step* bakoitzean, instalazioa osatzen duten m fluxuen (masa-fluxu, energia-fluxu eta exergia-fluxu) balioak lortu dira.

Batetik, TRNSYSi output bezala eskatu zaizkio \dot{m}_i , masa-fluxu bakoitzarako, \dot{W}_{35} , bero-ponparen energia elektriko fluxuaren kontsumoa eta \dot{Q}_{36} , gas-galdararen energia-fluxuaren kontsumoa.

Bestetik, TRNSYSen ekuazio-editorean, masa-fluxu bakoitzaren energia- eta exergia-fluxua, eta \dot{Q}_{36} -ren exergia-fluxua kalkulatzeko ekuazioak idatzi dira. Ekuazioetan, TRNSYSek kalkulaturako \dot{m}_i eta T_i , masa-fluxuaren eta horien tenperatura-balioak erabili dira. T_0 , egoera hilaren tenperatura, fluxuaren arabera finkatu da. Hala, 1-2 eta 9-10 fluxuen T_0 eraikinarenean erosotasun-tenperatura da eta 21 °C-ko balio konstantea hartu da. 3 eta 5 fluxuen T_0 lurzoruko tenperatura da. Beste fluxu guztien T_0 giro-tenperatura da. Lurzoruko tenperatura eta giro-tenperatura dinamikoa dira eta SCADAtik lortu dira [42]. Uraren bero espezifikorako, c_p , balio konstantea hartu da: 4,19 kJ/kgK.

Masa-fluxu bakoitzaren energia-fluxua, \dot{H}_i , honako ekuazio honekin kalkulatu da:

$$\dot{H}_i = \dot{m}_i \cdot c_p \cdot T_i \quad (8)$$

Masa-fluxu bakoitzaren exergia-fluxua, \dot{B}_i , honako ekuazio honekin kalkulatu da:

$$\dot{B}_i = \dot{m}_i \cdot c_p \cdot \left(T_i - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T_i}{T_0} \right) \quad (9)$$

Gas-galdararen erregaia gas naturala da, eta dagokion exergia kimikoa, masa-unitateko (b_{GN}), honako formula honekin kalkulatu da:

$$b_{GN} = 1,04 \cdot BBA \quad (10)$$

BBA erregaiaren behe bero-ahalmena da eta erregaiari dagokion korrelazio-koefizientea 1,04 da [45]. Erregaiaren BBA eta goi bero-ahalmena, GBA, honako ekuazio honekin erlazionatzen dira:

$$BBA = 0,9 \cdot GBA \quad (11)$$

Gas-galdararen energia-errendimendua galdara zeharkatzen duen fluxuak jasotzen duen energiaren eta gas-galdararen energia-kontsumoaren

arteko erlazioa da. Gas-galdararen energia-kontsumoa gasaren GBaren menpekoa da. Hortaz, \dot{Q}_{36} , gas-masa fluxuaren (\dot{Q}_{36}) kontsumoaren eta gasaren GBaren arteko erlazioa, honako ekuazio honen bidez adieraz daiteke:

$$\dot{Q}_{36} = \dot{m}_{GN} \cdot GBA \quad (12)$$

10., 11. eta 12. ekuazioetan oinarrituz, \dot{Q}_{36} -ren exergia-fluxua kalkulatzeko da:

$$\dot{B}_{36} = 1,04 \cdot 0,9 \cdot \dot{Q}_{36} \quad (13)$$

4. EMAITZAK

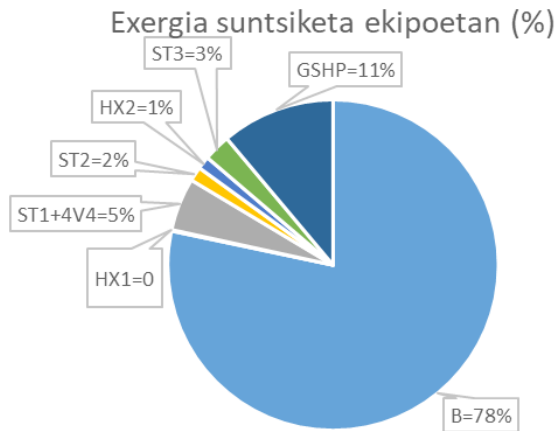
Balio bateratuak lortzeko, batu egin dira *time-step* bakoitzean lortutako balioak. Balio bateratuekin egin da lan, erakusten diren emaitzak lortzeko.

4. taulan, exergia-analisiaren exergia-suntsiketa balioak erakusten dira. Simulazioak erakusten du D1, M1, M2, D2, D3 eta V3V TYPEn sarreran eta irteeran berdina dela fluxuaren egoera termodinamikoa. Horregatik, elementu horietan 0 da exergia-suntsiketa. HX3 elementuaren kasuan, simulazioan berokuntza ez da gas-galdarekin sortu, instalazioaren kontrolak berro-ponparen erabilera lehenesten duelako berokuntza ekoizteko. Hortaz, elementu horretan exergia-suntsiketa 0 da.

4. taula. Exergia-suntsiketa ekipoen.

Zk.	Sinboloa	D(kWh)
1	B	1.437,83
2	D1	0,00
3	M1	0,00
4	HX1	2,22
5	ST1 + V4V	94,75
6	ST2	25,87
7	HX2	22,97
8	HX3	0,00
9	M2	0,00
10	D2	0,00
11	ST3	48,28
12	GSHP	204,13
13	D3	0,00
14	V3V	0,00

5. irudiak ekipo bakoitzari dagokion exergia-suntsiketaren ehunekoa erakusten du. Galdaran gertatzen da instalazioaren exergia-suntsiketa handiena: % 78. Bero-ponpak jarraitzen dio, % 11rekin. Beste elementuetan gertatzen den exergia-suntsiketa asko urruntzen da aipatutako balioetatik.



5. irudia. Exergia-suntsiketaren banaketa.

Ekipoen energia- eta exergia-efizientziak 5. taulako energia- eta exergia-balio bateratuetan oinarritzen dira. 2 eta 3. zutabeetan, elementu bakoitzaren fuelaren eta produktuaren definizioa adierazten da, 3. irudian erakusten den fluxuen zenbakitzeaz baliatuz. Bero-ponpari dagozkion fuela eta produktua ondorengo lerroetan definitzen dira.

Bero-ponparen fuelaren energia eta exergia energia elektrikoa (35 flu-xua) da. Bero-ponparen produktuaren energia, P_e , honako ekuazio honen bidez kalkulatu da:

$$P_e = H_6 - H_4 \quad (14)$$

H_6 eta H_4 6 eta 4 fluxuen entalpia-balioak dira. Bero-ponparen produktuaren exergia, P_{ex} , honako ekuazio honen bidez kalkulatu da:

$$P_{ex} = B_6 - B_4 \quad (15)$$

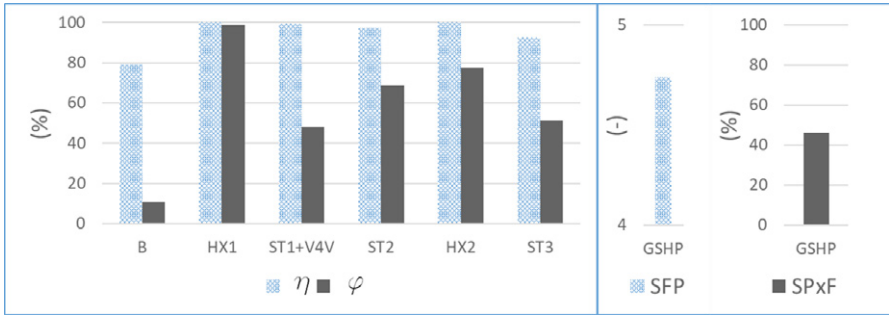
B_6 eta B_4 6 eta 4 fluxuen exergia-balioak dira.

Fuel eta produktu bakoitzari dagozkion energia-balioak F_e eta P_e zutabeetan adierazi dira, eta exergia-balioak F_{ex} eta P_{ex} zutabeetan. Exergia-balioak baxuagoak dira energia-balioak baino. Exergia-maila altuena sortze-sistema elikatzen duten fuelei dagokie.

5. taula. Fuelen eta produktuen energia- eta exergia-balioak.

Zk.	Sinboloa	F	P	Energia		Energia	
				$F_e(\text{kWh})$	$P_e(\text{kWh})$	$F_{ex}(\text{kWh})$	$p_{ex}(\text{kWh})$
1	B	[36]	[8-7]	1.723,41	1.365,58	1.613,11	175,38
4	HX1	[11-13]	[14-12]	1.398,11	1.417,24	178,80	176,57
5	ST1 + V4V	[14-21]	[1-2-22]	1.427,43	1.421,73	177,64	85,35
6	ST2	[16-24]	[22-23]	1.099,58	1.068,55	79,12	54,29
7	HX2	[15-17]	[16-18]	1.099,15	1.099,15	102,07	79,10
11	ST3	[30-31]	[9-10]	961,76	891,40	98,20	50,40
12	GSHP	—	—	432,52	2.049,26	432,52	199,13

6. irudian energia- eta exergia-efizientzia balioak erakusten dira. Energia-efizientziaren balioak altuagoak dira exergia-efizientziaren balioak baino, eta energia-efizientziaren adierazleak onak dira. Exergia-efizientziaren adierazleek, aldiz, kontrako joera erakusten dute. Sortze-sistema osatzen duten ekipoetan gertatzen da exergia-suntsiketa altuena, 5. irudian ikusten den bezala. Hortaz, galdarak eta bero-ponpak dituzte exergia-efizientziaren balio baxuenak. Balio numerikoak 6. taulan daude adierazita. Galdarak dauka exergia-efizientziaren baliorik baxuena: % 11.



6. irudia. Energia- eta exergia-efizientziak ekipoetan.

6. taula. Galdararen eta bero-ponparen energia- eta exergia-efizientziak.

Zk.	Sinboloa	Energia-efizientzia		Energia-efizientzia		
		$\eta(\%)$	SFP(—)	$\phi(\%)$	SPxF(—)	SPxF(%)
1	B	79	—	11	—	—
2	GSHP	—	4,74	—	0,46	46

5. ONDORIOAK

Gero eta beharrian gehiago dauzkagu egunerokoan, eta etxebizitzien konfort-termikoa oinarritzko eskubidea dugu. Klima-aldaketa areagotuz doa, eta gizakiaren beharrianak aldatuz doaz. Eraikinetako instalazio termikoak egoera aldakorrera moldatu behar dira, etxebizitzetan beharrezko maila termikoak bermatzeko. Instalazio termiko malgu eta efizienteak behar dira, eta eraikin eraginkorrak.

Energiaren erabilera zuzena bermatzeko, ezinbestekoa da tresna teknologiko berritzaileak eta metodologia berriak erabiltzea. Nahiz eta exergia-analisia aspalditik ezagutu, duela gutxira arte ez da eraikinetan aplikatu. Exergiak energia-fluxu batek lan erabilgarri bihurtzeko duen ahalmena adierazten du, eta, beraz, oso informazio baliagarria da energia-sistemak aztertzeko.

Lan honetan, sortze-sisteman gas-galdara bat eta lurzorura akoplatutako bero-ponpa bat dituen instalazio termiko hibrido baten energia- eta exergia-analisi dinamikoa egin da. Energia-efizientziaren adierazleek ez dute energia-forma ezberdinen kalitatea aintzat hartzen. Ikerketa honen kasuan, sortze-sistemako ekipoetan % 78ko energia-efizientzia eta 4,74ko SPF balioak kalkulatu dira. Balioek instalazioaren energia-portaera ona dela adierazten dute. Energia-analisia 1. printzipioan oinarritzen da. Printzipio horren arabera, energiak forma bakarrik aldatzen du: beroa lan bihurtzen da, eta aldearantziz. Energia kantitatea kontserbatu egiten da, eta ez du energia-kalitatearen inguruko aipamenik egiten.

Exergia-efizientziaren adierazleek, aldiz, kontuan hartzen dute energia-formen kalitatea, eta galdaran eta bero-ponpan exergia-efizientziaren eta $SxPF$ adierazleen emaitzak % 11 eta % 46 dira, hurrenez hurren. Energia-efizientziaren adierazleek ez bezala, exergia-efizientziaren adierazleek erakusten dute sortze-sistemako ekipoen exergia-portaera ez dela egokia; hau da, handia dela exergia-suntsiketa. Galdarak instalazioaren exergiaren % 78 suntsitzen du, eta bero-ponpak % 11. Kontuan hartu behar da exergia-suntsiketa propietate estentsibo bat dela, eta bat datorrela ekipo bakoitzaren funtzionamendu-orduekin; alegia, kontrolarekin. Gainera, exergia-analisia termodinamikaren 2. printzipioan oinarritzen da. Printzipio horren arabera, energia-eraldaketak lortzeko prozesu termodinamiko guztiek exergia suntsitzen dute; alegia, degradatu egiten dute energia-kalitatea. Energia kantitatea kontserbatu egiten da; ez, ordea, bere kalitatea. Beraz, energia-azterketak zehaztasunez egiteko, beharrezkoa da 2. printzipioa aintzat hartzea.

Exergia-suntsiketen emaitzei erreparaturaz, galdara da hobetu beharreko lehen ekipoa. Batetik, kontrolean eragin daiteke exergia-suntsiketa murrizteko: azken batean, funtzionamendu-ordu kopurua murrizten bada, exergia gutxiago suntsituko da galdaran guztira. Bestetik, exergia-efizientzian era-

giten bada, exergia-suntsiketa txikiagoa izango da. Horretarako, ekipoa bertan eragin behar da, produktu berdina lortzeko fuelaren kontsumoa murriztuz edota produktuaren exergia handituz (beroa tenperatura-maila altuago batera igoz). Baina hori galdararen operazio-kurba aldatuz soilik lor daiteke; alegia, haren energia-kurba hobetuz, eta, beraz, efizientzia hobeko galdara batekin ordeztuz.

Bero-ponpari dagokionez, exergia-suntsiketa murrizteko, exergia-efizientzia handitu behar da —edo, beste modu batera esanda, SxPF adierazlearen balioa handitu—; galdararen kasuan bezala, kontrol-parametroen exergia-produktuan optimizazioa eginez edota etekin hobeko ekipo batekin ordeztuz.

Aipatutako neurrien eragina ezagutzeko, zenbateko exergia-suntsiketa saihestu daitekeen kalkulatu behar da, eta zenbatekoa ezin den saihestu. Horretarako, exergia-analisi aurreratu dinamikoa aplika daiteke energia-ereduan.

2. printzipioaren ikuspuntua oso garrantzitsua da energiaren erabilera bere kalitatearen arabera bideratzeko. Exergia-suntsiketa murrizteko, eraikinak elikatzen dituzten energia-sareak birplanteatu egin behar dira, fuelaren exergia-maila eta produktuaren exergia-maila parekatuz. Bero-ponpa teknologia interesgarria da, oso entalpia baxua duten energia-iturriak usiatzeko ahalmena duelako. Kontrara, lana bero bihurtzen du, eta exergia-efikaziaren balio baxuak ematen ditu. Bero-ponpa eraikinen ohiko instalazioekin (panel fotovoltaiakoekin, esaterako) edota berritzaileagoak diren mini-instalazio eoliko edo hidraulikoekin konbinatzen bada, bero-ponparen egokitasuna bermatuko da energia-trantsizioan, bai eta eraikinen instalazio termikoen klima-aldaketa-errekiko erresilientzia eta jasangarritasuna ere.

ESKER ONAK

Egileek eskertu egiten dute Eusko Jaurlaritzaren Eraikuntza Kalitatearen Kontrolerako Laborategiak emandako laguntza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, «Data and statistics». <https://www.iea.org/data-and-statistics> (2021)
- [2] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, «DIRECTIVE (EU) 2018/844 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL», 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN> (2021)

- [3] BERARDI, «A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends», *Resour. Conserv. Recycl.*, libk. 123, or. 230-241, 2017.
- [4] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), «https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_37_Summary_Report_Heating_and_Cooling.pdf», ira. 2020.
- [5] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE) IDAE, «Informe anual de consumos por usos del sector residencial». 2021. [Sarean]. Available at: <https://informesweb.idae.es/consumo-usos-residencial/index.php>
- [6] V. VAKILOROYA, B. SAMALI, A. FAKHAR, eta K. PISHGHADAM, «A review of different strategies for HVAC energy saving», *Energy Convers. Manag.*, libk. 77, or. 738-754, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2013.10.023.
- [7] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), «https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_37_Summary_Report_Heating_and_Cooling.pdf», ira. 2020.
- [8] I. ANDRIĆ *et al.*, «Modeling the long-term effect of climate change on building heat demand: Case study on a district level», *Energy Build.*, libk. 126, or. 77-93, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.082>.
- [9] I. ANDRIĆ, M. KOC, eta S. G. AL-GHAMDI, «A review of climate change implications for built environment: Impacts, mitigation measures and associated challenges in developed and developing countries», *J. Clean. Prod.*, libk. 211, or. 83-102, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.128>.
- [10] M. ZHU, Y. PAN, Z. HUANG, eta P. XU, «An alternative method to predict future weather data for building energy demand simulation under global climate change», *Energy Build.*, libk. 113, or. 74-86, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.12.020>.
- [11] I. ANDRIĆ, A. PINA, P. FERRÃO, J. FOURNIER, B. LACARRIÈRE, eta O. L. CORRE, «The impact of climate change on building heat demand in different climate types», *Energy Build.*, libk. 149, or. 225-234, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.047>.
- [12] H. LUND *et al.*, «4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems», *Energy*, libk. 68, or. 1-11, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.
- [13] EUROPEAN GEOTHERMAL ENERGY COUNCIL (EGEC), «https://www.egec.org/wp-content/uploads/media_publication/Brochure-GSHP-2017-Web_final.pdf», ira. 2020.
- [14] E. BARBIER, «Geothermal energy technology and current status: an overview», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, libk. 6, zenb. 1, Art. zenb. 1, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3).
- [15] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE), «https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e9_geotermia_A_db72b0ac.pdf», ira. 2020.
- [16] A. M. OMER, «Ground-source heat pumps systems and applications», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, libk. 12, zenb. 2, Art. zenb. 2, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>.

- [17] I. SARBU et al. C. SEBARCHIEVICI, «General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings», *Energy Build.*, libk. 70, or. 441-454, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.068.
- [18] U. LUCIA, M. SIMONETTI, G. CHIESA, et al. G. GRISOLIA, «Ground-source pump system for heating and cooling: Review and thermodynamic approach», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, libk. 70, or. 867-874, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.268>.
- [19] GOBIERNO DE ESPAÑA, «<https://www.boe.es/eli/es/rd/2003/07/04/865>», abe. 2021.
- [20] A. G. OLABI, M. MAHMOUD, B. SOUDAN, T. WILBERFORCE, et al. M. RAMADAN, «Geothermal based hybrid energy systems, toward eco-friendly energy approaches», *Renew. Energy*, libk. 147, or. 2003-2012, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.09.140.
- [21] UNIÓN EUROPEA, «<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32013D0114>», ira. 2020.
- [22] SCHMIDT D. et al. SHUKUYA M., «New ways towards increased efficiency in the utilization of energy flows in buildings», *Res. Build. Phys.*, or. 671-81, 2003.
- [23] Michael J. MORAN, Howard N. SHAPIRO, Daisie D. BOETTNER, et al. Margaret B. BAILEY, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 7. arg. Wiley.
- [24] G. TSATSARONIS, «Combination of exergetic and economic analysis in energy conversion processes», 1985, or. 151-157. [Sarean]. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0021899181&partnerID=40&md5=f5825f660ec4871eab89fb10cd455b2d>
- [25] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), «https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annex_49_guidebook.pdf», ira. 2020.
- [26] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), «<https://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=37>», ira. 2020.
- [27] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), «<https://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=49>», ira. 2020.
- [28] Hans D. BAEHR, *Thermodynamik. Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen*. 1965.
- [29] A. BEJAN, *Advanced Engineering Thermodynamics*. 1988. doi: 10.1002/9781119245964.
- [30] M. SHUKUYA et al. D. KOMURO, «Exergy-entropy process of passive solar heating and global environmental systems», *Energy*, libk. 58, or. 25-32, 1996.
- [31] SALA-LIZARRAGA, et al. PICALLO-PEREZ, *Exergy Analysis and Thermoeconomics of Buildings: Design and Analysis for Sustainable Energy Systems*. Butterworth-Heinemann, 2019.
- [32] G. EVOLA, V. COSTANZO, et al. L. MARLETTA, «Exergy analysis of energy systems in buildings», *Buildings*, libk. 8, zenb. 12, Art. zenb. 12, 2018, doi: 10.3390/buildings8120180.
- [33] W. CHOI, R. OOKA, et al. M. SHUKUYA, «Unsteady-state exergy analysis for heat conduction of homogeneous solids under periodic boundary

- conditions», *Int. J. Heat Mass Transf.*, libk. 139, or. 773-788, 2019, doi: 10.1016/j.jheatmasstransfer.2019.05.051.
- [34] S. SAYADI, G. TSATSARONIS, eta T. MOROSUK, «Dynamic exergetic assessment of heating and cooling systems in a complex building», *Energy Convers. Manag.*, libk. 183, or. 561-576, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.090.
- [35] S. SAYADI, G. TSATSARONIS, T. MOROSUK, M. BARANSKI, R. SANGI, eta D. MÜLLER, «Exergy-based control strategies for the efficient operation of building energy systems», *J. Clean. Prod.*, libk. 241, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118277.
- [36] Q. MAO, Y. CHEN, S. JIN, L. SHI, eta L. XIAO, «Experimental analysis of a continuous operating ground source heat pump system in Wuhan, China», *Therm. Sci.*, libk. 22, or. 491-496, 2018, doi: 10.2298/TSCI171013261M.
- [37] PICALLO-PEREZ, SALA-LIZARRAGA, TSATSARONIS, eta SAYADI, «Advanced exergy analysis in the dynamic framework for assessing building thermal systems», *Entropy*, libk. 22, zenb. 1, Art. zenb. 1, 2020.
- [38] M. PENKUHN eta G. TSATSARONIS, «A decomposition method for the evaluation of component interactions in energy conversion systems for application to advanced exergy-based analyses», *Energy*, libk. 133, or. 388-403, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.03.144.
- [39] K. MENBERG, Y. HEO, W. CHOI, R. OOKA, R. CHOUDHARY, eta M. SHUKUYA, «Exergy analysis of a hybrid ground-source heat pump system», *Appl. Energy*, libk. 204, or. 31-46, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.076>.
- [40] R. LI, R. OOKA, eta M. SHUKUYA, «Theoretical analysis on ground source heat pump and air source heat pump systems by the concepts of cool and warm exergy», *Energy Build.*, libk. 75, or. 447-455, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.019>.
- [41] O. B. KAZANCI, M. SHUKUYA, eta B. W. OLESEN, «Theoretical analysis of the performance of different cooling strategies with the concept of cool exergy», *Build. Environ.*, libk. 100, or. 102-113, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.013>.
- [42] A. HERNÁNDEZ-ARIZAGA, A. PICALLO-PÉREZ, eta J. M. SALA-LIZARRAGA, «Procedure for modelling and calibrating operating thermal systems in buildings», *J. Build. Eng.*, libk. 45, 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103530.
- [43] W. T. TUTTE, *Graph Theory*. Cambridge University Press, 2001.
- [44] S. LIPSCHULTZ, *Linear Algebra*, 2nd arg. 1992.
- [45] T. J. KOTAS, «Exergy method of thermal and chemical plant analysis», *Chem. Eng. Res. Des.*, libk. 64, zenb. 3, or. 212-229, 1986.

