EKAIA (2023), artikulua prentsan/article in press.
https://doi.org/10.1387/ekaia.24600

ISSN: 0214-9001
e-ISSN: 2444-3255
©UPV/EHU Press

Eraikin pasiboen karakterizazio termikoa: Landare-fatxada modular baten kasu azterketa

(Thermal characterization of passive buildings: case study of a modular living wall)

Zaloa Azkorra-Larrinaga, Koldobika Martín-Escudero, Naiara Romero-Antón.*

Energetika eraikuntzan. Bilboko Ingeniaritza eskola (UPV/EHU)

LABURPENA:

Sistema berdeak sendotzen ari dira hirietako eskari termikoa murrizteko eta, aldi berean, hiriko bizitzaren kalitatea hobetzeko. Sistema berdeei lotutako onurak hainbat dira: biodibertsitatea handitzea, ekaitz-uren kontrola, energia aurreztea, tenperatura erregulatzea eta zarata arintzea. Landaredun sistema bertikalek errendimendu energetikoari egiten dioten ekarpenari buruzko ezagutza lortzeko, landaredun fatxada bati proba metodologikoak Paslink saiakuntza-zelula batean egin dira. Helburua landare-fatxada modular baten berokuntza- eta hozte-eskaria ezaugarritzea da. Emaitza nagusia isolamenduaren hobekuntza izan da. Erreferentziako fatxada 0.75 W/(m^2 C) baliotik abiatzen zen, eta 1.22 W/(m^2 C) -ko transmisio termikoko balioetara igaro zen landare-fatxadari esker; horrek esan nahi du isolamendu-ahalmena % 30 handitu zela. Fatxada berdeek energia aurrezteko potentzial handia dutela ondoriozta daiteke.

HITZ GAKOAK: Landaredun-fatxada modularra, Hozte pasiboa, Errendimendu energetikoa, Paslink proba-zelula.

ABSTRACT: *Modular living walls are being strengthened to reduce thermal demand in cities while improving the quality of life in the city. The benefits associated with green systems are increased biodiversity, storm water control, energy saving, temperature regulation and noise mitigation. In order to gain knowledge of the contribution of vertical plant systems to energy performance, methodological tests of the modular living wall have been conducted in a Paslink test cell. The objective is to characterize the heating and cooling demand of a modular living wall. The main result is the improvement of isolation. The reference façade started from a value of 0.75 W/(m^2 C) and passed to a thermal transmission value of 1.22 W/(m^2 C) thanks to the green façade, which means that insulation capacity increased by 30%. It can be concluded that modular living walls have great energy saving potential.*

KEYWORDS: Modular Living Wall, Passive Cooling, Energy Performance, Paslink Test Cell.

***Harremanetan jartzeko/ Corresponding author**: Zaloa Azkorra Larrinaga. Energetika eraikuntzan Saila. Bilboko Ingenieritza Eskola, UPV/EHU, Ingeniero Torres Quevedo Enparantza 1 (48013 Bilbo-Bizkaia), Euskal Herria https://orcid.org/0000-0003-4438-2891, zaloa.azkorra@ehu.eus

Nola aipatu / How to cite: *Azkorra Larrinaga, Zaloa;Martin-Escudero, Koldobika; Romero-Antón, Naiara* (2024). << Eraikin pasiboen karakterizazio termikoa: Landare-fatxada modular baten kasu azterketa >>, Ekaia, 45, xx-xx. (https://doi.org/10.1387/ekaia.24600)

Jasoa: ekainak 28, 2023; Onartua: irailak 20, 2023.

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © 2024 UPV/EHU

Obra *Creative Commons Atribución 4.0 Internacional*-en lizentziapean dago

1. SARRERA

Eraikinaren kanpoko inguratzaileak funtsezko eginkizuna betetzen du berokuntzaren eta hoztearen kontsumoen eskaeretan, funtsezkoa baita eraikinaren barruko ingurunean ingurumen-konforteko baldintza egokiak lortzeko. Ez da ahaztu behar inguratzaile ororen helburu nagusia kanpoko giroa eta etxebizitzaren barruko giroa bereiztea dela. Klima hotzetan beroa galtzea eta klima beroetan kanpoko azalerak gehiegi berotzea saihestuko da.

Eraikinen landare-fatxadak ematen duen ezaugarri bereizgarria babes-geruza berezia da, inguratzailearen elementuak eguzki-erradiazioaren aurrean isolatzen dituena. Landaredi-geruzak erradiaziotik babesten du eraikina, eta egituraren tentsio termikoak murrizten ditu. Horrela, fatxadako landarediak udan eraikinak hozten eta neguan apur bat isolatzen laguntzen du.

Fatxada berdeak hiri-birgaitzearen hurbilketa adimenduna izan daitezke, landaretza hiri-testuinguruan integratzen lagunduz, lurrak okupatu gabe, hiri-eremuen aprobetxamendua sustatuz eta eraikinen diseinua eta errendimendua hobetuz.

Landaredun fatxadak hiri-ingurunerako estrategia jasangarri baten parte izan daitezke [1]. Izan ere, landaretza hiriguneetan integratzeak hainbat ingurumen-onura ditu [2] eta horrek honako hauek eragiten ditu: airearen kalitatea hobetzea [3], CO_2 xurgatuz [4] eta hauts partikulak eta metal astunak atxikiz [5]; hiriko bero-uhartearen efektua arintzea [13], tokiko klima-baldintzetan eraginez (tenperatura eta hezetasuna); hiriko zarata murriztea eta xurgatzea [6] eta biodibertsitatea handitzea [7,8]. Aldi berean, landaretza hiri-ingurunean integratzeak eragin positiboa du gizakien osasunean, eta onura ekonomikoak ditu. Berdeguneen presentziak eragin estetikoa du inguruko hirigunean eta ondasunen balioa handitzen laguntzen du.

Eraikinen energia-eskariaren ondoriozko kostuak, bai berokuntzakoak, bai hoztekoak, kostu handiak dituzte. Horregatik, oso garrantzitsua da eraikin baten hozte-eskaria murrizteko inpaktua aztertzea, landaretza bertikaleko sistema bat (Vertical Greening System-VGS) instalatzearen ondorioz.

Eumorfopoulou eta Kontoleon [9] Grezian egindako ikerketa batetik abiatuta, frogatu zen landare-fatxadak hozteko estrategia egokiak direla eskualde mediterraneoko hiriguneetako eraikinetarako. Fatxadako sistema konbentzionalak huntzez estalitako landare-fatxadako sistemarekin alderatzean, guztiak orientazio bereko eraikin batean instalatuta zeuden. Landaredia zuten fatxadek landaretzarik gabeko fatxadek baino tenperatura askoz baxuagoak eta egonkorragoak zituztela ikusi zen. Gainera, landare-fatxaden ondorio positiboak esanguratsuagoak ziren egun oso beroetan. Beraz, eraikinetan instalatzea barruko baldintza termikoak hobetzeko irtenbide ezin hobea da.

Vox et al. [10] landare-fatxaden orientazioak eta isolamendu-geruzak eraikin baten hozte-eskaeran duten eragina aztertu zuten. Egiaztatu zenez, eraikinak landare-fatxada bat zuenean, hozte-kargak handiagoak ziren, eta isolamendua kanpoko azaleran zegoen, geruza hori barruko azaleran zegoen kasuarekin alderatuta. Hala ere, landaretzarik gabeko eraikin batekiko energia-eskariaren murrizketa-ehunekoak neurri handi batean aldatzen ziren landare-geruza kokatzen zen fatxadaren orientazioaren arabera, mendebaldeko orientaziorako % 20.08ko maximoa izatetik iparraldeko orientaziorako % 4.65eko minimoa izatera igaroz.

Wong eta Baldwin [11] frogatu zuten, halaber, landaredi-fatxadek eraikinetan zituzten ondorioak oso positiboak zirela udako baldintzetan. Kasu honetan, aukeratutako kontrol-parametroa batez besteko tenperatura erradiatzailea izan zen. Aztertutako kasu guztietatik, emaitzarik deigarriena baldintza jakin batzuetan batez besteko tenperatura erradiatzailea 10ºC murriztea izan zen. Ikusi zen landare-fatxadako tenperatura egonkorragoa zela landaretzarik gabeko fatxadako tenperatura baino.

Pérez et al. [12] Lleidatik gertu dagoen eraikin batean itzaltze-sistema gisa erabilitako landare-pantaila batzuek eragindako efektuetan bere ikerketa oinarritu zuten. Neurketek erakutsi zuten landare-pantailek mikroklima bat sortzen zutela landare-geruzaren eta itxituraren arteko espazioan, tenperatura baxuagoak eta hezetasun altuagoak zituena.

Landare-fatxaden ondoriozko hozte-efektua ere ikertu zuen [13], eraikinean sartzen den bero-fluxuaren arabera neurtu zuten. Eraikin batean orientazio bereko bi fatxada konparatuz, bata konbentzionala eta bestea landare-panelekin, ikusi zen egunean zehar landare-fatxadak 10 W/m^2-tik beherako fluxuak erregistratzen zituela, eta ohiko fatxadan, berriz, fluxua 40 W/m^2-rainoko tontorretara iristen zela. Bestalde, eraikinean sartzen zen fluxua arintzeari dagokionez, 4 orduko atzerapena erregistratu zen fatxadako tenperaturen igoeran, landaretzarik gabeko fatxadarekiko.

Azken urteotan, landare-azaleren aurrean sortzen den aire barearen geruzaren eta hostoek eragindako itzaltzearen ondorioei buruzko azterketak egin dira. Hong Kongen egindako ikerketa batean, [14] transmisio termodinamikoaren eredu bat garatu eta baliozkotu zuten, beroaren transmisioa eta landare-gainazaletako tenperatura-aldaketak simulatzeko, eguzki-babesaren eta itzaltzearen efektuetan sakontzeko.

Azkorra et al. [15] landare-fatxadetarako azaleko erresistentzia termikoko koefiziente bat definitu zuten, landare-geruza bat duten itxitura bertikalen inguruetan haizearen abiadura murriztean oinarrituta. Ikerketaren emaitzen arabera, landare-geruzak 0.7 m^{2}K/W handituko luke itxituraren erresistentzia termikoa, kanpoko azaleko erresistentziaren balioa.

Susorova et. al [16] frogatu zuten uda garaian fatxadaren gainean landare-geruza bat gehitzeak tenperatura 0.7tik 13.1 °C-ra jaitsi dezakeela, bero-fluxua kanpoko hormaren bidez 2 W/m^2-tik 33 W/m^2-ra, eta haren erresistentzia termiko eraginkorra 0.0tik 0.7 m^2 K/W-ra hobetu dezakeela. Hormaren orientazioaren, zona klimatikoaren eta landarearen ezaugarrien arabera, hosto-eremuaren indizea eta indargabetze erradiatzailearen koefizientearen arabera.

Stec et al. [17] egindako horma bikoitzeko fatxada baten estudioan. ikusi zuten geruza bikoitzeko fatxada osatzen duen geruza bakoitzaren tenperatura, oro har, askoz txikiagoa dela landareen kasuan, aldameneko horma edo pertsianen kasuan baino. Eguzki-erradiazio bererako, instalazioaren tenperaturaren igoera pertsianena baino bi aldiz txikiagoa da, gutxi gorabehera. Gainera, instalazioko tenperaturak ez du inoiz 35 °C-ko tenperatura gainditzen; pertsianak, berriz, 55 °C-tik gorakoak izan daitezke.

Landare igokarien landare-fatxada baten eta fatxada arrunt baten arteko konparazio-azterketan, [18] egiaztatu zuten tenperatura baxuagoa dela eta hezetasun-ehuneko handiagoa dagoela fatxada begetatuan eraikineko gainerako fatxada arruntetan baino. Fatxada begetatuko mahastiek tenperatura erregulatu eta tarte baten barruan mantentzen dute eta eguzki-energia bero sorra bihurtzen dute transpirazio-prozesuaren bidez, eta, beraz, landareak inguratzen dituen airearen tenperatura eta landareen hostoen gaineko tenperatura landareek itzaltzen ez dituzten fatxadak baino baxuagoak dira.

Lan honetan landare geruza eraikinean duen portaera termikoan ebaluatzea da. Inguratzailea osatzen duten elementuen ezagutza fisikoetan oinarrituz ekuazio diferentzialen multzoa aplikatuz eta horrela kutxa griseko metodoa garatzen da. Metodoa energia-balantzean oinarritzen da, kanpoko tenperatura eta energia-fluxuak portaera termikoen ezaugarriak definitzeko erabiltzen dituena. Proposatutako metodoa horma bikoitzeko (Bare Wall-BW) fatxada biluzi batean aplikatu zen, eta haren gainean landaredun horma modular bat (Modular Living Wall-MLW) ezarri zen Paslink a test zelda monitorizatu batean.

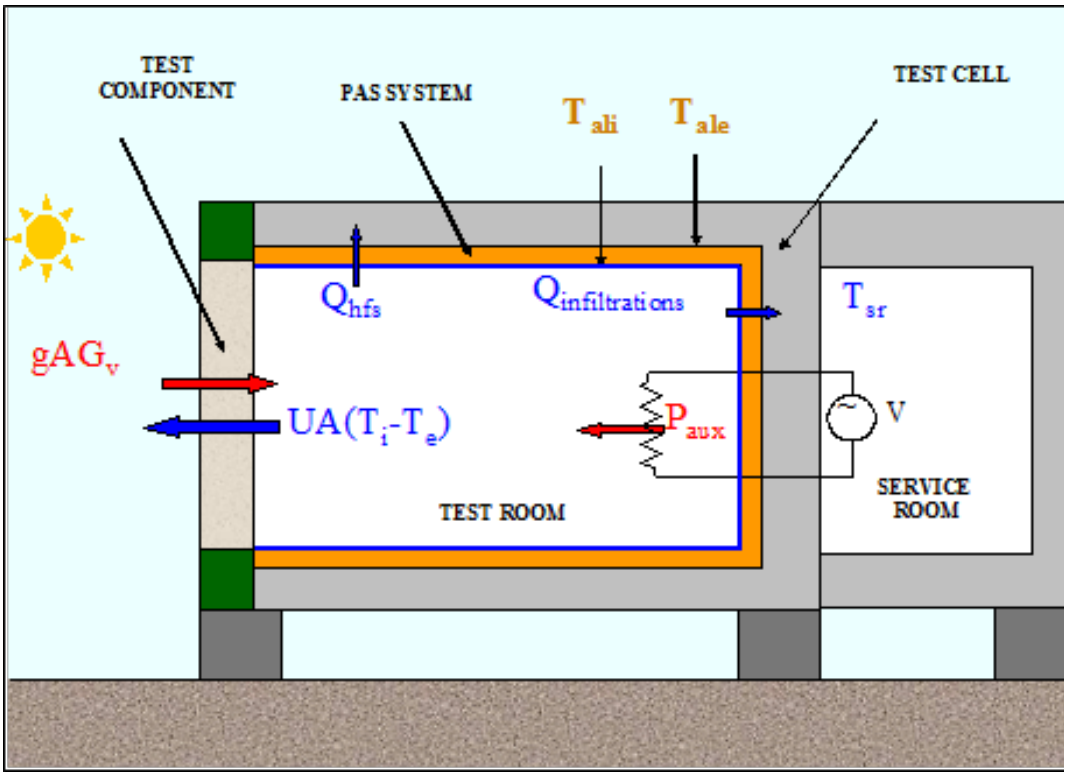
Ikerketa hau etorkizun handikoa da, eta lagungarri izan liteke VGSrekin lortutako energia-aurrezpena kuantifikatzeko erabil daitezkeen ereduak garatzeko, ingurumen-baldintza desberdinak dituen beste edozein tokitan. Eredu matematikoarekin eta aztertutako bi fatxadetan (BW eta MLW) lortutako emaitzekin, MLWren eraginkortasun energetikoan duen eragina ebaluatu daiteke, VGS duten eta ez duten eraikinen hobekuntza energetikoa kuantifikatzeko.

2. MATERIALAK

Esperimentuaren garapena Paslink test zelula batean egin zen (1. irudia). Paslink proba zelula eskala errealeko proba-baldintzetan lortutako datuen analisian oinarritzen da, eta eraikuntza-

elementuen ezaugarri termikoak lortzea du helburu. Paslink test-metodoari esker, kanpoko baldintzetan biziberritze pasiboa, landaredun fatxada modularra elementuren erantzun termikoa aztertu izan zen.

Esperimentazio-gunea Gasteizen dago, Araban, Espainiako iparraldean, Eusko Jaurlaritzaren Eraikuntzaren Kalitatea Kontrolatzeko Laborategiaren (LCCE) instalazioetan (latitudea: 42º 51N, longitudea: 2º41' W).

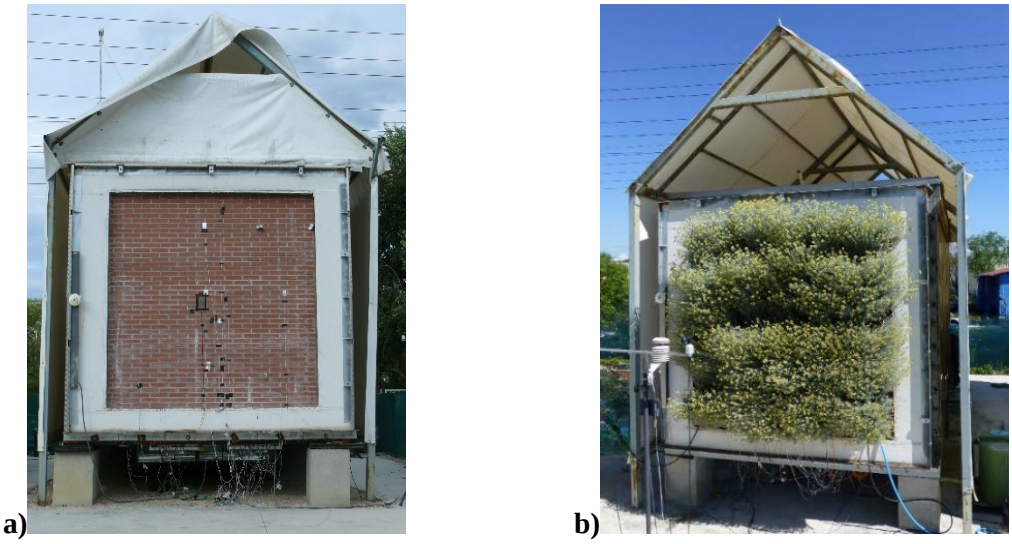


1. irudia. Energia balantzearen eskema Paslink zelda batean. [19]

Paslink proba zelulak kalorimetro bat bezala jokatzen du, zehaztasun handiz trukatzen diren bero fluxuak neurtzen ditu, irabaziak zein galerak, kontrolatutako barne ingurunearen eta kanpokoaren artean. Horma oso isolatzailez osatuta dago, azterketa-azaleran izan ezik, non landaredun fatxada modularraren lagina jartzen den (hegoaldeko fatxada).

2.1. Ebaluatutako fatxaden deskribapena

Landaredun fatxada modular bat (MLW) jarri da orri bikoitzeko oinarri-horman (BW), Paslink test zelula beraren hegoaldeko aurpegian (ikus 2. irudia). Helburua eraikuntzaren birgaitze-soluzioaren portaera termikoa ezaugarritzea eta energia modu pasiboan aurrezteko potentziala kuantifikatzea da.

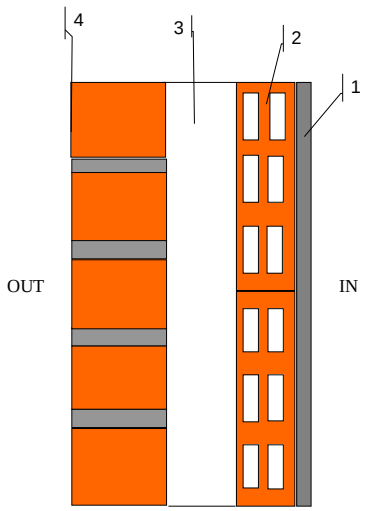


2. Irudia. Horma soluzioak Gasteizko PASLINK test-zelula esperimentalean. Ezkerretik eskuinera; a) erreferentzia: orri bikoitzeko oinarri-horman (Base Wall- BW); b) Landaredun fatxada modularra (Modular Living Wall- MLW).

Probatutako laginen kanpoko neurriak 2,7 x 2,7 metrokoak dira (laginaren azalera 7,3 m^2), eskala errealeko esperimentutzat har daitezke, baina baldintza kontrolatuetan.

2.1.1. Erreferentziazko horma: orri bikoitzeko oinarri-horma (BW)

Orri bikoitzeko oinarri-horman (BW) (ikus 3. irudia) honako geruza hauek dituzte barrutik kanpoaldera: zementuzko morteroa, 1.5 cm-ko lodierakoa, adreilu huts bikoitza (32 cm x 14 cm x 6.4 cm), aire-ganbera ez aireztatua (10 cm), bistako adreilua (22.8 cm x 49 cm x 10.5 cm).

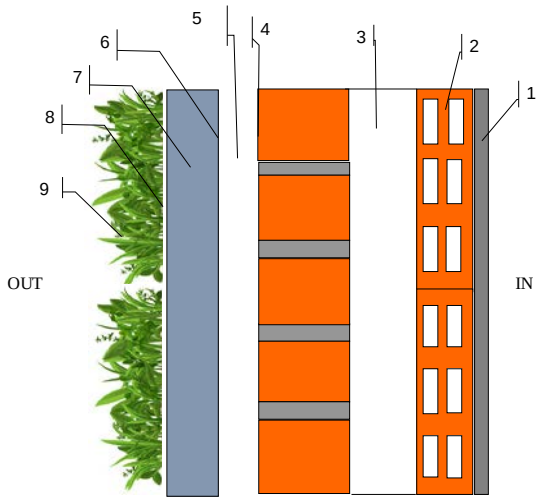


1. Zementu morteroa (1.5 cm)
2. adreilu huts bikoitza (6.4 cm)
3. aire-ganbera ez aireztatua (10 cm)
4. bistako adreilua (10.5 cm)

3. irudia. Aztertutako BWaren xehetasuna eta eraikuntza-sistemaren irudikapena**.**

2.1.2. Landaredun fatxada modularra MLW

Landaredun fatxada modularra BWaren gainean dago (1-4 geruza). Barrutik kanpora geruza hauek ditu: aire-ganbera aireztatua (5 cm), altzairu herdoilgaitzezko profilen gaineko oinarri metalikoa, hormari lotua torloju metalikoen bidez, substratua moduluak koko-zuntzez osatuta daude eta 600 x 400 x 80 mm polietileno birziklatuz eginak daude eta azkenik landare-geruza. Kanpoko geruza zuhaixka beti-berde edo iraunkor bat da (*Helichrysum italicum*), proba honetan aukeratutako landareak fatxadari uniformetasuna bermatzeko eta Gasteizko negu hotzetan bizirauteko ongi egokitua dagoelako.



1-4 BW
5. aire-ganbera aireztatua (5 cm)
6. moduluen barnealdea
7. Substratua eta ureztatze sistema (8 cm)
8. Moduluen kanpoaldea
9. zuhaixka iraunkorra

4. irudia. Aztertutako MLWaren xehetasuna eta eraikuntza-sistemaren irudikapena.

Moduluek, goialdean, itoginentzako lau sarrera dituzte, eta behealdean, drainatzeko bi irteera. Hermetikoki itxita daude, eta, beraz, estankoak direnez, ez da urik galtzen landare-fatxadaren barrualdetik; beraz, ez da beharrezkoa horma iragazgaiztea. Era berean, % 100eko estaldura duenez, ez da beharrezkoa horma entokatzea, egitura zuzenean fatxadan ainguratu baitaiteke.

Barrualdean polietilenozko bereizgailuak daude, barneko substratua homogeneoki zatituta dagoela bermatzeko. Modulu bakoitzak 5 kg-ko pisua du hutsik, eta 11 kg-ra iristen da substratua eta landareak lehorrean daudenean eta 21 kg-raino saturazio-egoeran daudenean.

5 irudia. (a) moduluen barnealdearen xehetasuna, (b) landareak erabat garatuta dituzten moduluak, (c) moduluaren atzealdeko xehetasuna, ainguraketa-egiturari eusteko kakoarekin (d) landaredun fatxadaren xehetasuna.

2.2. Datuen eta sentsoreen eskuratzea

Entsegu honetan benetako baldintza klimatikoen menpean muntaia esperimentala egin da. Honek tenperatura kontrolatuen eta bero neurtuaren bidez MLW soluzioen errendimendu termikoa aztertzeko aukera ematen du. Literaturaren arabera [20] eraikuntzan energia aurrezteko tresna pasiboa kalkulatzeko eta alderatzeko parametro nagusia kanpoko fatxadaren azaleko tenperaturaren portaera termikoa da.

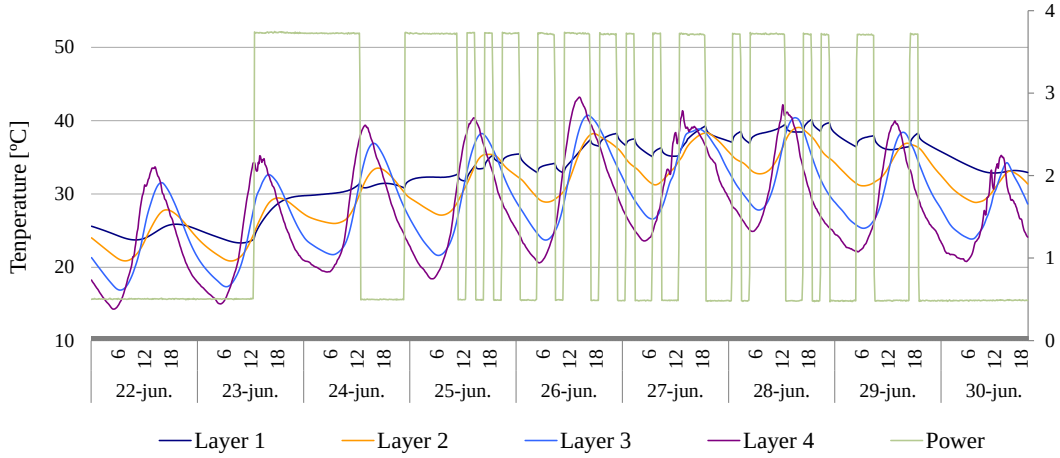
Ikerketa honetan aurkeztutako ikuskapen-kanpaina bi fasetan egin zen; lehenengoa 2012ko ekainean egin zen (A datu-multzoa). Aldi horretan, orri bikoitzeko horma bertikala muntatu eta ikuskatu zen. Bigarrenik 2014. urtean, MLWren instalazioa egin zen oinarrizko horman eta bertan monitorizazioa eginez (B datu-multzoa).

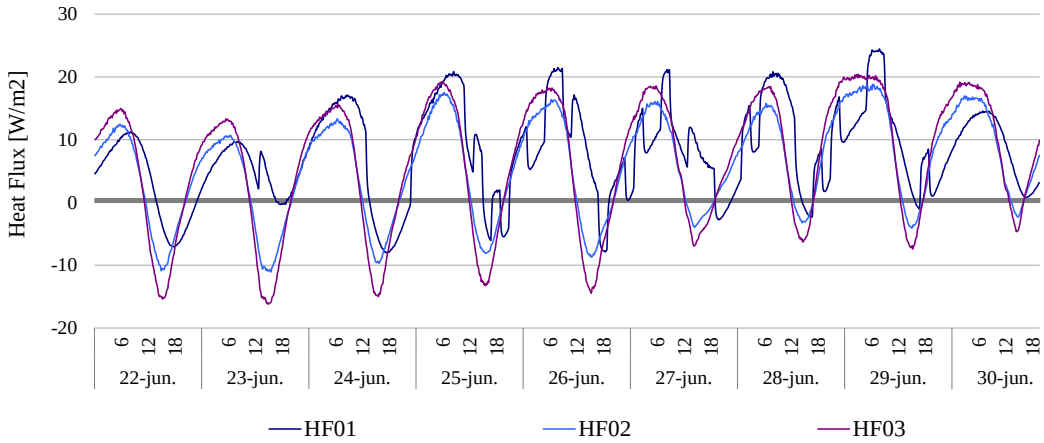
Paslink saiakuntza-zeluletako datu-bilketaren instrumentazioa eta kontrola Paslink zelulen neurketa- eta kalibrazio-eskuliburuetan ezarritako eskakizunen arabera egin dira [21-23]. Era berean, beharrezko sentsore guztiak instalatu dira (tenperatura, bero-fluxua, eguzki-erradiazioa, airearen tenperatura eta airearen abiadura) Paslink eskuliburuetako zehaztapenak betez. Paslink

test-zelula baterako sentsore estandarrak erabili ziren proba honetan, eta 1 minutuko tartearekin erregistratu ziren.

Erabilitako sentsoreak hauek dira: geruzaren tenperatura. platinozko lau termoresistantziarekin neurtu zen Pt100 (neurketaren zehaztasuna ± 0.1 ºC), analisi honetarako lau seinale horien batez bestekoa $T_{surf\text{-}out}$ gisa hartu da. MLWren aurrean aire tenperatura platinozko termoresistantzia batekin neurtzen zen Pt100 (neurketaren zehaztasuna ± 0.1 ºC), erradiaziotik babestua eta mekanikoki aireztatua. Hezetasun erlatiboa MLWren aurrean neurtu zen AHLBORN FHA 646 E1 sentsore batekin (neurketaren zehaztasuna ± % 2). Azkenik, MLWren eguzki-erradiazio bertikalaren gertaera Kipp & Zonen CM11-P piranometro bat erabiliz erregistratu zen (neurketaren zehaztasuna ± % 3).

2.2.1. BWran bero-fluxua eta klima-profilak (A datu multzoa)



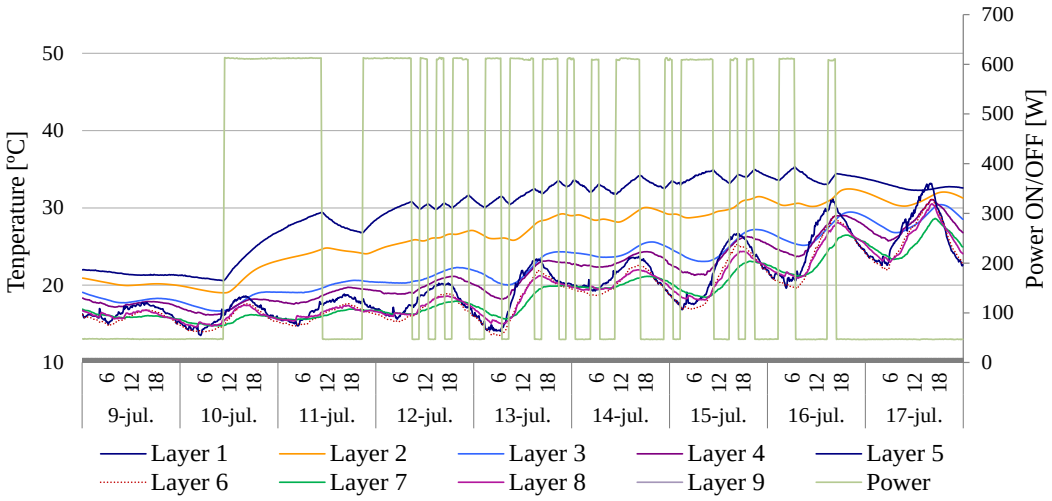


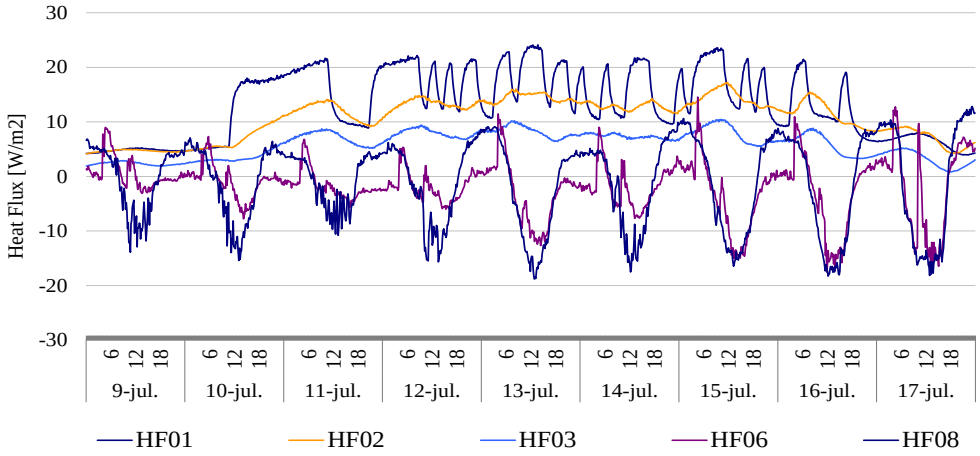
6.irudia. PRBS sekuentziak BWn eginak. Goian: laginaren geruzetako tenperaturen eboluzioa. Azpian: Bero fluxu sentsoreen eboluzioa laginaren geruza ezberdinetan (1HFTO1-Geruza 1; 1HFTO2-Geruza 2; 1HFTO3-Geruza 3) PRBS sekuentzian zehar (ekaina).

Aurreko irudiei erreparatuz gero, hainbat alderdi zehatz daitezke; batetik, lehenengo geruzan, tenperaturak erantzun azkarra ematen die laginketa-sekuentzian egindako potentzia-zikloei. Oinarri-horma osatzen duten geruzek (Geruza 1etik Geruza 4ra) joera bera dute, baina kanpoko geruzek tenperatura-oszilazio antzekoak dituzte egunez/gauez, kanpoan gertatutako tenperatura-aldaketekin alderatuta, eta horiek eguzki-erradiazioarekin lotuta daude.

Oinarrizko fatxadatik sartzen den bero-fluxua -15 W/m^2-ko balioetara iristen da egunaren erdiko orduetan, eta eguzki-erradiaziorik ez dagoen orduetan, hau da, gaueko orduetan, balio hori positibo bihurtzen dela.

2.2.2. MLWren bero-fluxua eta klima-profilak (B datu multzoa)





7.irudia. PRBS sekuentziak MLWn egindako sekuentziak. Goian: laginaren geruzetako tenperaturen eboluzioa. Azpian: Bero fluxu sentsoreen eboluzioa laginaren geruza ezberdinetan (1HFTO1-Geruza 1; 1HFTO2-Geruza 2; 1HFTO3-Geruza 3; 1HFTO6-Geruza 6; 1HFTO8-Geruza 8 PRBS sekuentzian zehar (uztaila).

Landaredun-sistema bertikalak kanpoko gainazalean duen ondorioetako bat eguzki-erradiazioa hormara iristea eragozten duela, gainazaleko tenperatura ez handitzea ziurtatuz. Efektu hau 7. Irudian ikus daiteke, non kanpoko eta barruko azaleko tenperaturak agertzen diren eta kanpoko airearen tenperaturarekin alderatzen diren.

Lehen esan bezala, argi dago BWko azken geruzan tenperatura MLWko kanpoko geruzaren tenperatura baino handiagoa dela. 24 orduko aldietan erregistratutako tenperatura maximoa BWn (40-43 ºC) altuagoa da MLWrekin erregistratutako tenperatura maximoa baino (31-34 ºC), kanpoko airearen tenperaturaren (31-34 ºC) eta eguzki-erradiazioaren maximoaren (500 W/m^2) balio berean.

MLWren eta BWren arteko alderaketak erakusten duenez, kanpoko airearen tenperatura berean (31-34 ºC), MLWk horien azpiko balioak ditu, 32 ºC gainditu gabe, eta adreiluzko fatxadak, berriz, 40 ºC. Argi dago MLWko tenperatura kanpoko airekoa baino baxuagoa dela egunez. Fatxada berdeak eragindako tenperatura-jaitsierak nabarmenagoak dira bero-ordu gorenetan. Gainera, kanpoko gainazaleko tenperatura kanpoko airearen tenperatura baino baxuagoa da beti. Azaleko tenperaturaren beherakada hau lurruntzearen, eguzki-babesaren eta substratuaren eta landare-fatxadak eskaintzen duen aire-geruzaren erresistentzia termiko gehigarriaren ondorio konbinatuen ondorioa da ziurrenik

3. METODOLOGIA

Paslink metodologia fisikoki interpretatutako eredu bat lortzeko erabiltzen da, identifikazio-sistema termikorako tresna estatistikoak erabiliz [49]. Abiapuntua RC greybox edo kutxa grisa eredu parametro kontzentratu bat da, denbora jarraituko ekuazio diferentzial arrunten multzo bat denbora diskretuko uneetan lortutako neurketa datu multzo batekin lotzen duena.

Saio honetan Paslink test-zelulan bildutako datuen erabilera aurkezten da RC sare batean oinarritutako MLW sistema pasibo bertikaletarako kutxa grisaren eredua definitzeko. Estatuko espazio-ereduak: fatxada osatzen duten elementuak erresistentzien eta kapazitateen bidez irudikatzea, eraikin baten dinamika termikoa denbora inbarianteko sistema lineal gisa modelatzeko. Kutxa grisak modelatzea prozedura iteratiboa da, eredu sinpleago batetik hasi eta gero eta konplexuagoa, eredu on bat lortu arte. Geruza anitzeko inguratzailea bi erresistentzia termikok, kondentsadore batek eta barne-nodo batek soilik defini dezakete [24].

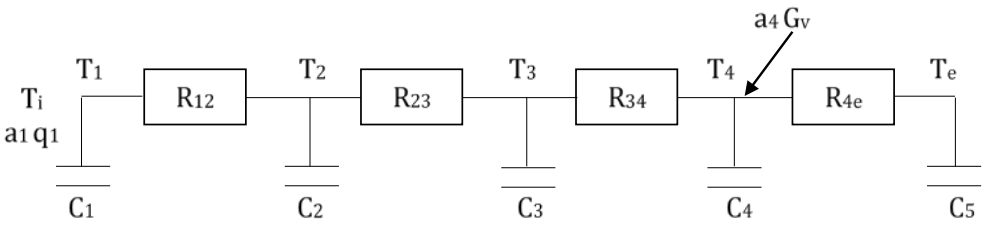
Fatxada pasiboaren muntaia esperimentalak BWn eta Paslink test-zelula berean tenperatura eta bero-fluxua kontrolatzeko probak ahalbidetzen ditu. Neurketa aktiboak egiteko, karga termiko artifizial bat aplikatu behar zaio Paslink proba zelulari. Batez besteko tenperatura-aldea 20 °C-koa izan behar da, gutxi gorabehera, probatutako osagaiaren barnealdearen eta kanpoaldearen artean, datu multzo fidagarriak lortzeko, ondoren datuak analizatzeko Paslink saiakuntza-zelulen saiakuntza-gelan sortzen diren berotze- edo hozte-seinaleek ez dute kanpoko tenperaturarekin erlazionatuta egon behar, bestela, neurtutako datu dinamikoak aztertzean, datuen analisi-teknikek ezin izango dute aztertutako osagaien tenperatura-portaera termikoa behar bezala karakterizatu.

Horregatik guztiagatik, PRBS (PseudoRandom Binary Sequence) seinaleak [25] maiztasun baxuko errutina, berokuntza edo hozte seinale gisa erabili dira 60 minutuko urratseko probetan.

Eraikuntza-soluzioak osatzen zituzten geruza bakoitzaren erresistentzia termikoaren karakterizazioa egin zen. Erresistentzia termikoa eroankortasun termikoaren eta geruza bakoitzaren lodieraren araberakoa da, geruzan zehar eroankortasunaren bidez bero-fluxuarekiko erresistentziaren indize bat da. Zenbat eta erresistentzia termiko handiagoa, orduan eta handiagoa geruza isolatzeko gaitasuna.

3.1. BWko RC sare termikoa (A datuak)

Garatutako RC eredua BWren portaera termikoa erreproduzitzeko gai da. Eredua garatzeko, Paslink sareak deskribatutako parametroak modelatzeko teknikak erabili ziren (parametroen identifikazio teknika), prozesu iteratibo baten bidez aplikatu zirenak. RC eredua lortu ondoren, zenbakizko eredu bihurtu zen, eta horrek BWa kalkulatzea ahalbidetu zuen aldi bakoitzeko. Azkenean, zenbakizko eredu hau udako baldintzetarako monitorizatutako geruza guztien informazioarekin balioztatu zen. Beraz, BWrako azken eredua RC sareak irudikatu zuen.



8. irudia. RC sarea, BWren ezaugarri termikoak zehazteko.

Jarraian, 1 geruzan gertatzen den bero-transferentziako prozesuaren ekuazio diferentzial estokastikoak agertzen dira. Ekuazio honek berogailuaren eta eguzki-erradiazioaren bero-sarrera hartzen du kontuan, baita 1 geruzaren barnealdetik datorren bero-fluxua ere (eroalea).

$$dT_1 = \left(\frac{1}{C_1 \cdot R_{12}}(T_2 - T_1) + \frac{a_1 \cdot q_1}{C_1}\right)dt \qquad \text{Ek. 1}$$

$$dT_2 = \left(\frac{1}{C_2 \cdot R_{12}}(T_1 - T_2) + \frac{1}{C_2 \cdot R_{23}}(T_3 - T_2)\right)dt \qquad \text{Ek. 2}$$

$$dT_3 = \left(\frac{1}{C_3 \cdot R_{23}}(T_2 - T_3) + \frac{1}{C_3 \cdot R_{34}}(T_4 - T_3)\right)dt \qquad \text{Ek. 3}$$

$$dT_4 = \left(\frac{1}{C_4 \cdot R_{34}}(T_3 - T_4) + \frac{1}{C_4 \cdot R_{4e}}(T_e - T_4) + \frac{a_4 \cdot G_v}{C_4}\right)dt \qquad \text{Ek. 4}$$

$$dT_e = \left(\frac{1}{C_5 \cdot R_{4e}}(T_4 - T_e)\right)dt \qquad \text{Ek. 5}$$

Sistema jarraituaren ekuazioak ekuazio diferentzial estokastiko akoplatuak dira. Neurtutako balioak honako hauek dira: T_1 eta T_4 arteko tenperatura geruzak, 1 geruzako bero fluxua (q_1), erradiazio bertikal globala (G_v) eta kanpoko aire tenperatura (T_e). Ondorioz, hormako erresistentzia termikoak (R_{12}, R_{23}, R_{34} eta R_{4e}) eta kapazitantziak (C_1, C_2, C_3, C_4 eta C_5) kalkula daitezke.

q_1, G_v eta T_e aldagaiak modeloarentzako datuak dira eta denbora-tarte guztietarako ezagutzen dira, neurtutako balioak baitira.

LORD programaren denbora-tarteetarako datuak erabiliz, gainerako tenperaturak kalkulatuko dira. Softwareak, irteerako aldagaiak definitu ondoren, sistemaren parametroen balioak kalkulatzen ditu eta funtzio objektiboa minimizatzea lortzen duen arte erabiltzen du.

Horregatik, kutxa griseko modeloek, denbora espazioaren eredu linealean formulatuak dira, bero transferentzia deskribatzen dute eraikuntza sistema ezberdinen bidez (BW eta MLW). Eredu estokastiko bat lortzen da; izan ere, zaratatzat jotzen diren efektuak ez dira aipatzen aipatutako eredu akusatiboan. Kasu honetan, egindako neurrien errorea edo zarata honela adieraziko litzateke:

$$\boldsymbol{V_N}\,(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{N}}\sum_{\boldsymbol{k=1}}^{\boldsymbol{N}} \|\boldsymbol{\varepsilon_k}(\boldsymbol{\theta})\|^{\mathbf{2}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{N}}\sum_{\boldsymbol{k=1}}^{\boldsymbol{N}} \left(\left(\boldsymbol{T_{Layer1,obs}} - \boldsymbol{T_{Layer1,calc}}\right)\right)^{\mathbf{2}} \quad . \qquad \text{Ek. 6}$$

Atal honetan erabilitako prozedura berari jarraituz (RC eredua), oinarrizko horma osatzen duten osagai edo geruzen bero-transferentziako parametroak kalkulatzen dira, hau da, 2. geruzatik 3. geruzara eta 3. geruzatik 4. geruzara. Horrela, osagai horiek ezaugarritzen dituzten gainerako parametroak kuantifika daitezke.

3.2. MLWko RC sarea (B datuak)

2014ko uztailaren 8tik 16ra egindako PRBS sekuentziak erabili ziren MLWren parametro termikoak kalkulatzeko.

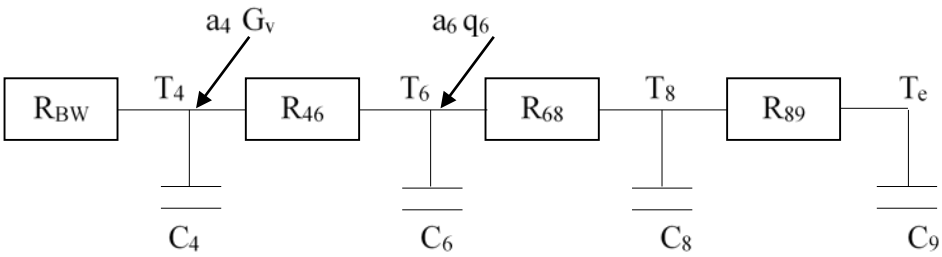


Fig. 9 RC sarea, MLWren ezaugarri termikoak zehazteko.

Lehenik eta behin, beroa transferitzeko prozesua arautzen duten ekuazioak 9. irudian aurkezten dira (ekuazioaren unitate guztiak [W/m^2] n daude).

$$dT_4 = \left(\frac{1}{C_4 \cdot R_{46}}(T_6 - T_4) + \frac{a_4 \cdot G_v}{C_4}\right) dt \qquad \text{Ek.7}$$

$$dT_6 = \left(\frac{1}{C_6 \cdot R_{46}}(T_4 - T_6) + \frac{1}{C_6 \cdot}(T_8 - T_6) + \frac{a_6 \cdot q_6}{C_6}\right) dt \qquad \text{Ek.8}$$

$$dT_8 = \left(\frac{1}{C_8 \cdot R_{68}}(T_6 - T_8) + \frac{1}{C_8 \cdot R_{89}}(T_9 - T_8)\right) dt \qquad \text{Ek.9}$$

$$dT_e = \left(\frac{1}{C_9 \cdot R_{89}}(T_8 - T_e)\right) dt \qquad \text{Ek.10}$$

Non q_6 (kasu honetan HF06) eta $T_9 = T_e$ = ATE01 eta G_v. T_4 (4. geruzako tenperatura) irteera gisa hartuko da. LORD softwareak sarrera eta irteera horiek erabiliko ditu kasu bakoitzerako parametroak identifikatzeko.

Kontutan hartu behar da q_6, G_v eta T_9 aldagaiak modeloarentzako datuak direla eta denbora-tarte guztietarako ezagutzen direla, neurtutako balioak baitira.

Sarrerako datuak k = 1, N denbora-tarteetarako erabiliz, LORD softwareak gainerako tenperaturak kalkulatuko ditu. Irteerako aldagaiak definitu ondoren, softwareak ekuazio-sistemaren parametroen balioak kalkulatzen ditu, funtzio objektiboa minimizatzea lortu arte. Kasu honetan, honela adieraziko litzateke:

$$\boldsymbol{V_N}\,(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{N}}\sum_{\boldsymbol{k=1}}^{\boldsymbol{N}} \|\boldsymbol{\varepsilon_k}(\boldsymbol{\theta})\|^{\mathbf{2}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{N}}\sum_{\boldsymbol{k=1}}^{\boldsymbol{N}} \left(\left(\boldsymbol{T_{Layer4,obs}} - \boldsymbol{T_{Layer4,calc}}\right)\right)^{\mathbf{2}} \quad . \qquad \text{Ek.11}$$

4. EMAITZAK

Lan honetan garatutako metodologiaren eraikuntzako soluzio bertikal pasibo baten errendimendu termikoa ebaluatzea, Paslink saiakuntza-zelda batean neurtutako datuetan oinarrituta, eta hainbat agertoki alderatzea (BWren errehabilitazioaren aurretik eta ondoren) helburua da.

Atal honen xede nagusia azterlan honetan aurkeztutako fatxadak osatzen dituzten elementuen ezaugarri diren parametro termikoak deskribatzea da. Horretarako, aurreko puntuan deskribatutako oinarrizko hormaren eta birgaitze-elementu pasiboen erresistentzia termikoa eta gaitasun termikoa kalkulatu dira, Eraikuntzaren Kode Teknikoak (CTE) [26] E eranskinean ezarritako baldintzetan.

4.1. BWren ezaugarri termikoak

Oinarrizko horma osatzen duten eraikuntza-elementuen parametroen identifikazioaren emaitzak hurrengo taulan (Ikusi taula1) daitezke:

1. Taula BWren RC ereduaren emaitzak osatzen dituzten geruzen emaitza termikoa:

Geruza	U [W/ºC m^2]	R [ºC m^2/W]	C [kJ/ºC m^2]	Hondarra
Geruza 1- 2 Zementu morteroa 1.5 cm + adreilu huts bikoitza 6.4 cm	3.84	0.26	153.74	0.18
Geruza 2- 3 aire-ganbera ez aireztatua 10 cm	2.70	0.37	0.00	0.19
Geruza 3- 4 bistako adreilua 10.5 cm	8.33	0.12	65.40	0.18
∑ Geruza 1- 4	1.33	0.75	219.14	-

1. taulan ikus daitekeenez, zementuzko morteroz eta adreilu bikoitz hutsez osatutako BWa osatzen duen lehen geruzak 0.26 ºC m^2/W-ko erresistentzia termikoa du. Bigarren geruzaren balioa (non – aireztatutako gabeko aire-ganbera) 0.37 ºC m^2/W-ko erresistentzia termikoa dagokio. Azkenik, aurrealdeko bistako adreiluz osatutako geruzak gainerako osagaien erresistentzia termikoaren heren bat du.

Kanpo soluzio konstruktiboaren eguzki-irradiazioak sortzen duen bero-fluxua ez da berehala eraikinaren barruko airera eramaten, lehenik geruzan edo eraikuntza-elementuan biltegiratzen da eta ondoren askatu egingo da, elementuaren kapazitatearen arabera.

4.2. MLW ezaugarri termikoen neurketa

Landaredun fatxada osatzen duten elementu eraikitzaileen parametroen identifikazioaren emaitza hurrengo taulan aurki daiteke (Ikusi 2. taula):

2. Taula. MLWren RC ereduaren emaitzak osatzen dituzten geruzen emaitza termikoa:

Geruza	U [W/ºC m^2]	R [ºC m^2/W]	C [kJ/ºC m^2]	Hondarra
Geruza 1- 4 (BW)	1.33	0.75	205.56	0.94
Geruza 4- 6: aire-ganbera aireztatua 5 cm	10.00	0.10	0	-
Geruza 6- 8: MLW modulua+substroa 8 cm	4.34	0.23	96.12	0.26
Geruza 8- 9: Landareak 50 cm	7.14	0.14	12.03	0.64

∑ Geruza 1- 9 (MLW)	0.82	1.22	313.71	-

2. taulan MLW osatzen duten geruzen parametro termikoak agertzen dira. Aire-ganbera aireztatuak (Geruza 4- 6) 0.10 ºC m^2/W-ko erresistentzia termikoa du, landare-moduluak 0.23 ºC m^2/W-koa eta, azkenik, landaretzak 0.14 ºC m^2/W-koa. Beraz, eraikuntza-soluzioaren isolamenduan duen eragin positiboa MLWari esker ematen da, eraikuntza-elementu hau gehitzeak hasierako BWaren isolamendua hobetzen baitu.

Udako urtaroen kasuan lortutako balioak aztertuz, hau da, erosotasunaren interesa fatxadaren kanpoko geruza hoztean datzanean erradiazioa maximoetara eta kanpoko tenperaturetara iristen baita. Hormaren tenperatura murriztea landare fatxadak eragiten du, eta horrek tenperatura modu pasiboan murrizteko gailu egokiak bihurtzen ditu. Itxitura bat berritu nahi bada bero-galerak murrizteko, komeni da isolamendu-geruza bat gehitzea oinarrizko horman, landaredun fatxadaren aurretik.

MLWn, ezaugarri termikoek hobekuntzak erakusten dituzte. Kasu honetan, oinarrizko hormaren 0.75 W/(m^2 ºC)-tik 1.22 W/(m^2 ºC)-ra transmisio termikoko balioetara igaro zen honek isolatzeko ahalmena % 30 handituz.

5. ONDORIOAK

Birgaitze termikoa izan zen landare-fatxada inolako elementu isolatzailerik gabe eraikitzea, landare-moduluaz gain, substratua eta landareak barne. Moduluetan zehar bero-fluxuak eta landaredia bera ahalik eta hobekien ezaugarritzeko balio izan zuen.

Erosotasun termikoa handitzeak esan nahi du kanpoko muturreko tenperaturek (udakoek zein negukoek) eraikinaren barruko tenperaturan duten eragina murriztea, eta, horrela, energia-beharrak murriztea, barneko tenperatura egonkor mantentzeko, dela hozte edo berokuntzaren bidez. Erresistentzia termikoaren (R) balioa nabarmen hobetu da hasierako horma bikoitzaren 0.75 ºC m^2/Wtik hasierako balioekin alderatuta, landare-fatxadaren akoplamenduari esker 1.22 ºC m^2/W-ra hobetuz.

Datu esperimentalek erakusten dute landaredun horma modularrak eraikinaren kanpoko geruzaren tenperatura murrizten duela, batez ere eguneko beroketa murriztuz. Landaredun fatxada modularraren gainazaleko tenperaturari dagokionez, emaitzek baieztatzen dute gainazal begetatuaren ondoriozko hozte-efektu potentziala esanguratsua dela. Tenperatura 10 ºC-tan hozten da udako egunez. Hozte horren ondorioz, landaredun fatxada modularraren hozte-ahalmena egiazta daiteke. Horregatik, landaretza eta eraikuntzako isolamendu-materialen

erabilera komunak azalerak hozteko sistemak garatu ditzake, biztanleen erosotasun termikoa eta energia aurreztea helburu dutenak. Landaretzaren efektua aztertuz gero, gainazaleko tenperaturetan gertatzen da; landareen itzalaren ondorioz gertatzen da, horrela, gainazalekin kontaktuan dagoen airea babestuz, hau ez baita berotzen.

Eraikuntza-soluzio hori erabiltzeak bero-garaian eraikinen tenperatura jaistea ekarriko luke, erabiltzaileen erosotasuna hobetuz eta energia-eskaera murriztuz. Hotz garaian, aldiz, hozte pasiboaren efektua negatiboa izango litzateke, baina kontuan izan behar da neguan eguzki-erradiazioa eta tenperatura txikiagoak direla, eta, beraz, landareen ebapotranspirazio ahalmena ere murriztu egiten dela. Saiakuntza horretatik ondorioztatzen da posible dela landare-fatxadaren portaera energetiko hobea izatea jatorrizko fatxadaren eta landare-fatxadaren artean isolatzaile bat instalatuta, eta horrek hobetu egingo luke haren portaera termikoa, bai udan, bai neguan ere.

ESKER ONAK

Proiektu hau Eusko Jaurlaritzaren eta Euskal Herriko Unibertsitatearen UPV/EHU arteko hitzarmenari esker gauzatu da, Eusko Jaurlaritzako Eraikuntza Kalitatearen Kontrolerako Laborategiko Termika Arloa (LCCE) kudeatu eta garatzeko ENEDI ikerketa-taldearen bitartez.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Bano P, Dervishi S. The impact of vertical vegetation on thermal performance of high-rise office building facades in Mediterranean climate. Energy Build 2021;236:110761.

[2] Azkorra-Larrinaga Z, Erkoreka-González A, Flores-Abascal I, Pérez-Iribarren E, Romero-Antón N. Defining the cooling and heating solar efficiency of a building component skin: application to a modular living wall. Appl Therm Eng 2022;210:118403.

[3] Viecco M, Jorquera H, Sharma A, Bustamante W, Fernando HJS, Vera S. Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. Build Environ 2021;204:108120.

[4] Marchi M, Pulselli RM, Marchettini N, Pulselli FM, Bastianoni S. Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system. Ecol Model 2015;306:46-56.

[5] Ysebaert T, Koch K, Samson R, Denys S. Green walls for mitigating urban particulate matter pollution—A review. Urban Forestry & Urban Greening 2021;59:127014.

[6] Azkorra Z, Pérez G, Coma J, Cabeza LF, Bures S, Álvaro JE et al. Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. Appl Acoust 2015;89:46-56.

[7] Berthon K, Thomas F, Bekessy S. The role of ‘nativeness’ in urban greening to support animal biodiversity. Landscape and urban planning 2021;205.

[8] Collins R, Schaafsma M, Hudson MD. The value of green walls to urban biodiversity. Land Use Policy 2017;64:114-23.

[9] Eumorfopoulou EA, Kontoleon KJ. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. Build Environ 2009;44:1024-38.

[10] Vox G, Blanco I, Convertino F, Schettini E. Heat transfer reduction in building envelope with green façade system: A year-round balance in Mediterranean climate conditions. Energy Build 2022;274:112439.

[11] Wong I, Baldwin AN. Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region. Build Environ 2016;97:34-9.

[12] Pérez G, Rincón L, Vila A, González JM, Cabeza LF. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. Appl Energy 2011;88:4854-9.

[13] Ahsan MM, Cheng W, Hussain AB, Chen X, Wajid BA. Knowledge Mapping of Research Progress In Vertical Greenery Systems (VGS) From 2000 To 2021 Using CiteSpace Based Scientometric Analysis. Energy Build 2021:111768.

[14] Abdul Nasir MH, Hassan AS. Thermal performance of double brick wall construction on the building envelope of high-rise hotel in Malaysia. Journal of Building Engineering 2020;31:101389.

[15] Azkorra-Larrinaga Z, Erkoreka-González A, Martín-Escudero K, Pérez-Iribarren E, Romero-Antón N. Thermal characterization of a modular living wall for improved energy performance in buildings. Build Environ 2023:110102.

[16] Susorova I, Angulo M, Bahrami P, Brent Stephens. A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. Build Environ 2013;67:1-13.

[17] Stec WJ, van Paassen, A. H. C., Maziarz A. Modelling the double skin façade with plants. Energy Build 2005;37:419-27.

[18] Koyama T, Yoshinaga M, Hayashi H, Maeda K, Yamauchi A. Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. Build Environ 2013;66:96-103.

[19] Jiménez MJ, Madsen H. Models for describing the thermal characteristics of building components. Build Environ 2008;43:152-62.

[20] Coma J, Pérez G, de Gracia A, Burés S, Urrestarazu M, Cabeza LF. Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. Build Environ 2017;111:228-37.

[21] van der Linden, G. P, van Dijk, H. A. L, Lock AJ, van der Graaf F. COMPASS Installation guide HFS Tiles for the PASSYS Test cells. 1995DOI.

[22] PASSYS Operations Manual. 1993DOI.

[23] van Dijk, H. A. L, van der Linden, G. P. PASLINK Calibration and Component Test Procedures. , 1995DOI.

[24] Ramallo-González AP, Eames ME, Coley DA. Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions. Energy Build 2013;60:174-84.

[25] Letherman KM, Palin CJ, Park PM. The measurement of dynamic thermal response in rooms using pseudo-random binary sequences. Build Environ 1982;17:11-6.

[26] CTE. CODIGO TECNICO DE LA EDIFICACIÓN. Documento Básico HE 1. Ahorro de energía. BOE 25/01/200. DOI.