



DOKTOREGO-TESIA

Donostiako ondare eraikiaren birgaitze energetikoa
Inguratzaile termikoan esku-hartzea

Rehabilitación energética del patrimonio edificado de
San Sebastián

Intervención sobre la envolvente térmica



Doktoregaia:

Alexander Martín Garín

Zuzendaria:

José Antonio Millán García

Urria

2018

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos



Donostiako ondare eraikiaren birgaitze energetikoa Inguratzailer termikoan esku-hartzea

Rehabilitación energética del patrimonio edificado de
San Sebastián

Intervención sobre la envolvente térmica

Energia Eraginkortasuna eta Jasangarritasuna Ingeniaritzan eta Arkitekturan Doktorego Programa

Programa de Doctorado en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Ingeniería y Arquitectura

Doktoregaia:

Alexander Martín Garín

(alexander.martin@ehu.eus)

Zuzendaria:

José Antonio Millán García

(j.millanhu.eus)

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

GIPUZKOAKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE GIPUZKOA

Donostia-San Sebastián

2018

Doktorego Tesi hau Eusko Jaurlaritzako Hezkuntza Sailaren
Doktoretza-Aurreko Programa laguntzarekin garatu da.
(PRE_2014_1_3)

Esta Tesis Doctoral ha sido desarrollada con el soporte del Programa
Predoctoral del Departamento de Educación del Gobierno Vasco.
(PRE_2014_1_3)





Agradecimientos

Si bien la consecución de la Tesis Doctoral recae sobre el propio doctorando, resultaría muy desconsiderado no agradecer a todas aquellas personas que de una manera u otra me han apoyado así como por la confianza que han depositado en mí durante estos últimos años. Es por ello que bajo estas líneas me gustaría expresar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas e instituciones con las que he podido compartir esta etapa tan importante de mi vida.

En primer lugar a mi Director de Tesis, el Dr. José Antonio Millán-García, quien me otorgó la oportunidad de adentrarme en el camino de la investigación y quien, desde las primeras tutorías para el Trabajo de Fin de Máster, día a día me ha ido orientado en los pasos a seguir. Es él quien me suscitó el interés y quien me ha aportado esa amplia visión y conocimiento sobre el fascinante campo de la energética en la edificación. Me gustaría agradecerle además por su apoyo en el plano personal ya que verdaderamente ha sido como un padre. Ha sido un placer y un honor poder contar con su apoyo, sin el cual todo esto no hubiera podido llegar a feliz término. ¡Gracias por todo!

Agradezco también a todos los compañeros del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, del Grupo de Investigación ENEDI y del Área Térmica del Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación por su inestimable apoyo siempre que lo he necesitado. Mención especial merece el Dr. José María Sala-Lizarraga, por darme la oportunidad de trabajar en su Grupo de Investigación y por su incansable labor de llevarlo siempre adelante. Quienes tenemos la suerte de poder conocerlo sabemos la gran persona que es y por ello le estamos enormemente agradecidos.

Me gustaría agradecer también a la Escuela Ingeniería Gipuzkoa, lugar que considero mi segundo hogar y donde comencé a recibir mis primeras clases magistrales, y a sus integrantes quienes cuando lo he necesitado siempre han estado ahí ofreciendo su apoyo incondicional. Quiero agradecer a su vez a los alumnos con los que he tenido la gran suerte de comenzar mis primeros pasos docentes y quienes de una forma indirecta me han ayudado al recibir un feedback adicional sobre los primeros contenidos de la investigación.

Aux collègues de l'IUT Ville d'Avray de l'Université Paris Nanterre, notamment au Professeur Abdherramane Baïri, qui m'a affectueusement accueilli avec mes pierres pendant mon séjour de doctorat à son université. Merçi beaucoup pour tout!



Quiero extender mi más sincero agradecimiento a su vez a todas aquellas instituciones y empresas con las que a lo largo de estos años de investigación he tenido la oportunidad de colaborar y han hecho posible poder llevar a cabo la Tesis: Departamento de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Donostia-San Sebastián, Departamento de Medio Ambiente de Diputación de Gipuzkoa, CIFP EAGI LHII, CIFP Usurbil LHII, Kursaal Rehabilitaciones Integrales, Igaran Rehabilitaciones, A+O Arquitectos, TMS Arquitectos.

Debo también gran parte de los agradecimientos al Departamento de Educación del Gobierno Vasco al otorgarme la beca del *Programa Predoctoral de formación del personal investigador no doctor*. Sin su soporte no hubiera sido posible llevar a cabo el trabajo realizado.

Reservo unas líneas también a mis antiguos compañeros de la universidad con quienes comencé mis primeros pasos en el sector de la edificación, así como a Rubén Ganzo Pérez quién generó en mi las primeras preocupaciones y el interés en todo lo relacionado con la eficiencia energética y sostenibilidad en la edificación a través del proyecto del Hotel Rural de Sabinas del Arlanza.

En el plano personal quiero agradecer también a la kuadrilla y al equipo de fútbol que durante todo este tiempo mediante su apoyo, cenas, parrandas y los partidos me han permitido desconectar y liberar la mente en los momentos difíciles.

Un cariñoso agradecimiento a mi familia por estar siempre ahí y por el apoyo que siempre me ha dado. A mi Ama, por su inagotable paciencia y comprensión que ha tenido conmigo y por transmitirme esa fuerza, alegría y espíritu suyo para afrontar cualquier obstáculo que pueda acontecer a lo largo de la vida. Al Aita, mi mentor a lo largo de la vida y con quién he tenido la suerte de poder compartir este camino de desarrollo de nuestras Tesis Doctorales apoyándonos mutuamente y que sin duda ha sido una experiencia inolvidable. A mi hermana Amaia por su constante apoyo y preocupación que ha mostrado durante el transcurso de la tesis. Por último, no hay palabras que me permitan expresar todo mi agradecimiento a la persona con la que he comenzado una nueva etapa de mi vida. Mila esker beti hor nire ondoan egoteagatik eta Tesiaren garapenean prestatu didazun laguntza kalkulaezinagatik. Asko maite zaitut Maitane!

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que han hecho posible esta Tesis y que he olvidado mencionar sobre estas líneas.

Eskerrik asko guztioi!

En Donostia-San Sebastián, octubre de 2018.

Laburpena

Eraikuntzaren sektorea, kontsumo energetikoaren %40aren arduraduna dena, energia modu eraginkorrean erabiltzeko neurrien aplikazioaren arloa da, honela, trantsizio energetikoan aurrera eginez. Horregatik, eraikinen energia errendimendua hobetzeko zenbait Europako zuzentarau eta horien transposizioak aplikatzen ari dira Europar Batasuneko herrialdeetan.

Gutxi gorabehera Europar Batasuneko higiezin parkearen %97a, 30 mila milioi m²-ko azalerarekin, ez da energia eraginkortzat hartzen eta honen %80a gutxi gorabehera 2050 urtean erabiltzen jarraituko da. Gainera, 2009 urtean eraikinek erabilitako energiaren %68a etxebizitzek kontsumitu zuten, eraikitako azaleraren %76a aurkeztuz. Kontsumo energetikoa hau berotzeko, hozteko, etxeko ur berorako, sukalderako eta etxetresna elektronikoa erabiltzen da. Hala ere, erabilera nagusia etxeko guneak berotzeko da, etxeen kontsumoaren %70eko arduraduna izanik.

Eraikin berriak kontsumo txikiko estandarrekin diseinatu ahal izan arren, bizitegi-sektorea %1eko hazkunde-tasa izan dezala espero da. Gainera, herrialde gehienetan eraikuntza berrien tasan jaitsiera bat nabaritzen da eraikuntza sektorean krisi ekonomikoak izan duen eragina dela eta. Beraz, zalantzarik gabe, eraikitako parkean zentratzen den erronka aurkezten da, energia birgaitzean arreta berezia jarri behar delarik. Horrek sektorean ekintzak aurrera eramateko eta eraikinen kalitatea eta bizigarritasuna hobetzeko aukera paregabea aurkezten du

Eraikitako parkearen barruan, bere balio historiko-artistikoengatik ezaugarri oso nabarmenak aurkezten dituen tipologia bat existitzen da, Eraikitako Ondarea. Bere kategoria desberdinetan, tipologia hau ez da bereizten bere arkitektura bereziagatik bakarrik, hirien identitate urbanoa eta jatorriak mantentzen laguntzen du. Historiaren lekuko gisa, kulturaren eta gizartean duen eragina oso garrantzitsua da. Horrez gain, ondarearen birgaitzearen inguruan azkenaldian garatutako teoriak, dokumentuak eta eztabaidak eta gero, arkitektura edo monumentu berezitasun handiko eraikinak soilik ez dira kontuan hartu behar talde honetan. Lehen bigarren mailakoak kontsideratzen zirenak edo jatorri sozialekoak zirenak gaur egun kontuan hartzen dira ere. Beraz, eraikinen birgaitze tekniken aplikazioak eremu handia du hirietako eraikin parkean.

Gaur egungo Eraikuntzako Kode Tekniko araudiak energia eraginkortasuneko neurriak eraikuntza hauetara aplikatzea ez dela derrigorrezkoa ezartzen du. Araudi espezifikoek ezak, aldi berean, arrisku bat sortzen du. Izan ere, eraikin horietan



egindako esku-hartzeek eraikinaren itxura arkitektonikoan eragina izan dezakete edota osasun eta segurtasun baldintzetan kalte bat suposatu dezakete ondo egiten ez badira.

Tesiaren helburua Eraikitako Ondarearen kontserbazioaren eta bere eraginkortasun energetikoa hobetzeko neurrien arteko konexioa ezartzea da. Horretarako, neurri pasiboen aplikazioa ikuspuntu holistiko baten bidez eginik. Honek mota honetako esku-hartzeen kalitatea bermatzen duten irizpide desberdinak planifikatzea eta kontuan hartzea ekartzen du berarekin. Era honetan esku-hartze atzeraezinak saihestu ahal izatea posible izango da.

Hobekuntza proposamen guztiak aurretiko analisi batekin hasten dira, eta honek, hobetze tartea zein den ezagutzen lagunduko du. Hala eta guztiz ere, eraikinen birgaitze energetikoan eta batez ere ebaluatutako eraikinen tipologia, eraikinen kontsumo energetikoan eragina duten eraikuntza elementuen propietateak zehazki ezagutzea zaila da. Horregatik, tesiaren lehen atalean ikertutako eraikuntzen kontsumo energetikoan eragin nabarmena duten eraikuntza osagaien ezaugarri termikoak aztertzen dira.

Horretarako, ikerketaren lehen zatian azterketaren eraikuntza tipologiaen propietate termikoen karakterizazioarako aurrera eramandako oinarritzko saiakerak aurkezten dira, modu honetan hasierako ebaluazioarako oinarri errealistak ezarriz. Fase esperimental hau burutzeko asmoz, azterketa eremua Donostiako hiriaren hemeretzigarren mendeko Zabalgunera mugatu zen, bere arkitektura eklektikoagatik eta inguruko Eraikitako Ondarearen adierazgarri izateagatik. Lehenengo urratsean airearen estankotasunaren ebaluazioa egin zen eraikin erakusgarrien lagin batean. Izan ere, parametro honek ikerketa eremuan energia galerak ezartzen ditu. Guztira 37 "ate-haizagailu" motako entsegu egin ziren erabilera eta kontserbazio egoera desberdineko eraikinen laginaren estankotasun maila aztertzeko.

Ondoren, fatxadako hormak ingurutzaille termikoaren elementu garrantzitsuenak direla kontuan hartuz, hauen analisi termikoa burutu zen. Lehenik eta behin, elementu konstruktibo hauetan nagusi diren harrizko materialen (hareharria eta kareharria) karakterizazio termiko esperimentalak egin zen eroankortasun termikoko saiakuntzen bidez. Elementu nagusi horien propietateak ebaluatu ondoren, bero garraioaren simulazio energetikoan oinarritutako ebaluazioarekin jarraitu zen hormen karakterizazio termiko orokorra garatzeko. Hormek bere lodieraren eta propietate termikoen arabera aniztasuna aurkezten dutenez, simulazio parametrikoko eredu bat garatu zen. Honek erantzun termikoaren ereduak garatzea ahalbidetu zuen aldakuntza horiek kontuan hartuz. Gainera, simulazio

parametrikotan lortzen diren emaitzen doikuntza ahalbidetzen duen eredua garatu da erregresio doitze metodoaren bidez eta honela, tipologia honetako hormen portaera termikoa modu azkar batean ezagutu daiteke.

Beste alde batetik, tipologia honetako eraikuntzei ezarritako mugapen logikoek, esate baterako, eraikitako ondarearen babes neurriak, ingurutzailan egin daitezkeen ekintzak nabarmenki mugatzen dituzte. Ondorioz, tesi honetan Barruko Isolamendu Termikoko Sistemen (BITS) ebaluazio zehatza aurrera eramaten da, ingurutzailaren zati opakuaren bidez sortzen diren galera termikoak murrizteko asmoz esku-hartze ez intrusibo baten bidez. Horretarako, erreferentziako klimatologian eraikuntzako material eta osagaien bero eta hezetasun garraioa konbinatzen dituen eredu eta simulazio mono eta bidimentsionalak burutu dira. Honela, egiaztatu gabeko esku-hartzeek eraikinen ingurutzaille termikoan sortu ditzaketan prozesu patologikoak identifikatu eta konpontzeko ebaluazio higratermikoa garatu ahal izan da.

Ingurutzaille termikoen energia eraginkortasuna hobetzeko esku-hartze espezifikoak ezarri ondoren bere kuantifikazioa eta eraikin mailan duten efektua aztertzea beharrezkoa bihurtzen da. Hori dela eta eraikinen simulazio energetikoen bitartez hobekuntza energetiko egoera anitz aztertu dira esku-hartze desberdinen bidez. Horrela aztertutako eraikin tipologia lortu daitezkeen berokuntza-eskariaren murrizketa detektatzea posible izan da. Aldi berean, berokuntza-eskariaren murrizketa helburua konbinazio ezberdinekin lortu daitezkeela kontuan hartuta, optimizazio ereduaren erabilera esku-hartze optimoak, bere kostu-energia loturari dagokionez, detektatzea ahalbidetu izan du.

Fase esperimentalean beharrezkoa izan da instrumentazio eta datuen eskuratze prozesuei buruzko ezagutza eskuratzea datuen analisisia aurrera eramateko. Arlo honetan aurkitzen diren mugek, eta merkatuan teknologia eta komunikazio protokolo berrien agerpenek, egoera honi konponbidea emateko jarraitu beharreko ikerketaren bidea harmonizatu dute. Horretarako, Open Source Plataformak (OSP) eta Gauzen Interneta (GI) bezalako teknologietan oinarritutako ekipamenduak funtzionalak garatu dira.

Ondorioztatu daiteke garatutako metodologiaren bitartez proposaturiko neurriek ez dutela ahalbidetzen eraikin berrien eraginkortasun maila lortzea. Hala eta guztiz ere, horien aplikazioak kalitatea eta erosotasuna nabarmenki hobetu dezake eraikitako ondarean. Neurri pasiboen bidez lortutako kontsumo energetikoaren murrizketak eta erosotasunaren hobekuntzak aurrerapauso bat suposatzen dute, aldi berean, balio historiko eta artistikoa mantentzen delarik. Horregatik, tipologia honetako eraikuntzak ez dira atzean geratu behar hobekuntza energetikoaren araudian eta sektoreak eskaintzen dituen aukerez etekina atera dezakete.



Hitz gakoak: Eraikin historikoak, Eraikitako ondarea, Energia eraginkortasuna, Airearekiko estankotasuna, Blower Door Test, Barruko Isolamendu Termikoko Sistema (BITS), Portaera higrotermikoa, Eraikinen monitorizazioa, Gauzen Interneta, Iturburu Irekiko Plataformak.

Resumen

El sector de la edificación, responsable del 40% del consumo de energía final, es un foco de atención y de aplicación de las medidas de eficiencia energética con objetivo de avanzar en la ruta hacia la transición energética. Por ello, se están aplicando diversas directivas europeas y sus correspondientes transposiciones en los Estados Miembros como medidas para mejorar el comportamiento energético de los edificios.

Aproximadamente el 97% del parque inmobiliario de la Unión Europea que asciende a 30 mil millones de m² no se considera energéticamente eficiente y aproximadamente el 80% de este seguirá en uso en 2050. Además, en el año 2009 el 68% de la energía final utilizada en edificios fue consumida por los hogares, lo que representa el 76% de la superficie edificada. Este consumo de energía se emplea en calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria, cocina y electrodomésticos, sin embargo, el uso predominante es la calefacción de espacios, responsable del 70% del consumo en las viviendas.

Si bien los nuevos edificios se pueden diseñar bajo estándares de *muy bajo consumo energético*, la tasa de crecimiento anual en el sector residencial ronda el 1%. Además se observa una disminución de la tasa de las nuevas construcciones de la mayoría de los países como reflejo de la huella de la crisis financiera en el sector de la construcción. Por tanto, no cabe duda que hay un gran reto que se focaliza sobre el parque edificatorio existente con especial énfasis en su rehabilitación energética. Esto supone una gran oportunidad de actuación para el sector y para mejorar tanto la calidad de los edificios como sus condiciones de habitabilidad.

Dentro del parque edificado, existe una tipología con características muy relevantes debido a sus valores histórico-artísticos conocido como Patrimonio Edificado. En sus diversas categorías, esta tipología no sólo se distingue por su singularidad arquitectónica, también destaca por contribuir a mantener la identidad urbana de las ciudades y preservar sus orígenes. Como testigos de la historia, su impacto en la cultura y en la sociedad adquiere un papel muy relevante. Además, tras las últimas Teorías, Documentos y debates desarrollados sobre la Restauración del Patrimonio, se debe de considerar que no sólo los edificios de gran singularidad arquitectónica o monumentales se encuentren dentro de este grupo. Aquellos considerados previamente como secundarios o de origen social, son hoy en día también reconocidos. Por tanto, el campo de aplicación de las técnicas de regeneración edificatoria tiene una amplia cuota en el parque edificatorio urbano.



Actualmente la normativa del Código Técnico de la Edificación en materia de eficiencia energética excluye la obligatoriedad de aplicación a estos edificios. La falta de regulación específica genera a su vez el riesgo de que las medidas de intervención adoptadas sobre estos edificios puedan afectar a la imagen arquitectónica de los edificios o que incluso también produzca el detrimento de las condiciones de salubridad y seguridad de los mismos si no se ejecutan adecuadamente.

El objetivo de la tesis es establecer un puente de conexión entre la conservación del Patrimonio Edificado y las medidas para la mejora de su eficiencia energética a través de un enfoque holístico en la aplicación de medidas *pasivas*. Esto implica planificar y tener en consideración diferentes criterios que permitan garantizar la calidad de este tipo de intervenciones y evitar así las posibles actuaciones con resultados irreversibles.

Toda propuesta de mejora parte de un análisis previo que permitirá conocer el margen de mejora posible o razonable. No obstante, en la rehabilitación energética de edificios y especialmente en la tipología edificatoria evaluada, es difícil conocer con certeza las propiedades de los elementos constructivos que afectan directamente a la demanda energética de los edificios. Por ello, en la primera parte de, la tesis se analiza la caracterización térmica de los componentes constructivos que repercuten notablemente sobre la demanda energética de los edificios estudiados.

Para ello, la primera etapa de la investigación aborda los ensayos básicos de caracterización de propiedades térmicas de los materiales utilizados en la tipología edificatoria del estudio, que han permitido sentar bases realistas para la evaluación inicial. Con el objeto de poder llevar a cabo esta fase experimental se procedió a acotar el análisis al área del Ensanche Decimonónico de la ciudad de Donostia-San Sebastián, caracterizado por su arquitectura ecléctica y como patrón representativo de una buena parte de la edificación patrimonial del entorno. Se procedió a efectuar en primer lugar a la evaluación de la estanquidad al aire de una muestra de edificios representativos, por ser este uno de los principales parámetros que marcan las pérdidas energéticas en el área de estudio. Se realizaron un total de 37 ensayos "puerta-ventilador" con objeto de plasmar el grado de estanqueidad de la muestra de edificios catalogados con distintos tipos de uso y estado de conservación.

A continuación, teniendo en consideración los muros de fachada principal como los elementos más notorios de la envolvente térmica, se procedió a desarrollar un análisis térmico de los mismos. En primer lugar se comenzó con la caracterización térmica experimental de los materiales pétreos predominantes en estos elementos constructivos, la piedra arenisca y la caliza, a través de los ensayos de su conductividad térmica. Una vez valoradas las propiedades de estos elementos principales se

continuó con evaluaciones basadas en la simulación energética del transporte de calor para poder desarrollar una caracterización térmica global de los muros. Dada la gran diversidad existente entre los muros en función de su espesor y propiedades térmicas de los materiales se desarrolló un modelo de simulación paramétrico que permitió obtener el patrón de respuesta térmica teniendo en cuenta estas variaciones. Además, se ha desarrollado un modelo capaz de ajustar los resultados obtenidos en las simulaciones paramétricas mediante el método de ajuste por regresión y poder así conocer de un modo rápido el comportamiento térmico de esta tipología de muros.

Por otro lado, las lógicas limitaciones impuestas a esta tipología edificatoria como son las medidas de protección del patrimonio edificado, hacen que la actuación exterior sobre la envolvente se encuentre muy restringida. Como consecuencia, la presente tesis aborda la evaluación detallada de Sistemas de Aislamiento Térmico Interior (SATI) como medida no intrusiva para la reducción de las pérdidas térmicas a través de la parte opaca de la envolvente. Para ello se ha realizado el modelado y simulación mono y bidimensional del transporte combinado de calor y humedad en materiales y componentes de construcción para la climatología de referencia. Así se ha podido desarrollar una evaluación higrotérmica que ha permitido identificar y solventar los procesos patológicos que podrían provocar las intervenciones no contrastadas sobre la envolvente térmica de los edificios.

Tras establecer soluciones específicas de mejora energética de las envolventes, se hace necesaria su cuantificación y efecto a nivel de edificio completo. Es por ello, que a través de la simulación energética de edificios se ha procedido a evaluar distintos escenarios de mejora energética mediante diversas propuestas de intervención. De esta manera se ha logrado hallar el margen de reducción en la demanda energética de calefacción que es posible alcanzar en la tipología edificatoria evaluada. A su vez, teniendo en consideración que el objetivo de reducción de la demanda de calefacción puede ser logrado a través de distintas combinaciones, se ha hecho uso de modelos de optimización que han permitido detectar aquellas intervenciones óptimas en relación a su coste-energía.

La fase experimental ha necesitado adquirir un conocimiento específico en materia de instrumentación y adquisición de datos para su posterior análisis. Las limitaciones existentes actualmente en este campo, y la reciente irrupción en el mercado de nuevas tecnologías y protocolos de comunicación abiertos, han armonizado una línea de investigación transdisciplinar que ha permitido dar solución a esta situación. Para ello se ha procedido a implementar equipos de desarrollo propio completamente



funcionales basados en tecnologías como las Plataformas de Código Abierto (OSP) y el Internet de la Cosas (IoT).

Se concluye que si bien las medidas propuestas mediante la metodología planteada no permiten alcanzar los mismos niveles de alta eficiencia que se pueden lograr en edificios modernos de nueva construcción, la aplicación de las mismas pueden mejorar notablemente la calidad y confort de los edificios patrimoniales. Las mejoras obtenidas mediante la reducción del consumo energético mediante medidas pasivas y la mejora en el confort térmico, preservando al mismo tiempo el valor histórico-artístico, indican que esta tipología edificatoria no debe quedar relegada en las regulaciones de mejora energética y pueda beneficiarse de las oportunidades que brinda el sector

Palabras clave: Edificios históricos, Patrimonio edificado, Eficiencia energética, Estanqueidad al aire, Ensayo puerta ventilador, Sistema de Aislamiento Térmico Interior (SATI), Comportamiento higratérmico, Simulación energética de edificios, Monitorización de edificios, Internet de la Cosas, Plataformas de Código Abierto.

Summary

The building sector, responsible for 40% of final energy consumption, is a focus of attention and application of energy efficiency measures with the aim of advancing in the direction of energy transition. Therefore, several European directives and their corresponding transpositions are being applied in the Member States as a measure to improve the energy performance of buildings.

Approximately 97% of the building stock in the European Union amounting to 30 billion m² is not considered energy efficient and approximately 80% of this will remain in use by 2050. In addition, in 2009 68% of the final energy used in buildings was consumed by households, which represents 76% of the built surface. This energy consumption is used in heating, cooling, domestic hot water, kitchen and appliances. However, the predominant use is the heating of spaces, responsible for 70% of consumption in homes.

Although the new buildings can be designed under very low energy standards, the annual growth rate in residential sector is around 1%. There is also a decrease in the rate of new construction in most countries as a consequence of the financial crisis in the construction sector. Therefore, there is no doubt that there is a great challenge which focuses on the existing building stock with special emphasis on energy rehabilitation. This supposes a great opportunity for the sector to improve both the quality of the buildings and the conditions of habitability.

Within the building stock, there is a typology with very relevant characteristics due to its historical-artistic values known as Built Heritage. In its various categories, this typology is not only distinguished by its architectural singularity, it also stands out for contributing to maintaining the urban identity of cities and preserving their origins. As witnesses of history, its impact on culture and society acquires a very relevant role. In addition, after the development of the latest Theories, Documents and debates of the Restoration of Patrimony, it must be considered that not only the buildings of great architectural or monumental singularity are in this group. Those previously considered as secondary or buildings with a social origin are nowadays also recognized. Therefore, the field of application of building regeneration techniques has a large share in the urban building stock.

Currently the Código Técnico de la Edificación (Spanish building regulation) regulations in the field of energy efficiency exclude the obligatory application to these buildings. At the same time, the lack of specific regulation creates the risk that the intervention measures adopted on these buildings may affect the architectural image



of the buildings or may even be detrimental to the health and safety conditions of the buildings if they are not executed properly.

The aim of the thesis is to establish a connection bridge between the conservation of the Built Heritage and the measures to improve its energy efficiency through a holistic approach in the application of passive measures. This implies planning and taking into account different criteria to guarantee the quality of this type of intervention and thus avoid possible actions with irreversible results.

Any improvement proposal starts with a previous analysis that will allow knowing the possible or reasonable margin of improvement. However, in the energy rehabilitation of buildings and especially in the building typology evaluated, it is difficult to know with certainty the properties of the construction elements that directly affect the energy demand of the buildings. Therefore, in the first part of the thesis the thermal characterization of the construction components that have a significant impact on the energy demand of the building is performed.

For this, the first stage of the research deals with the basic essays of characterization of thermal properties of the materials used in the building typology of the study, which have allowed to establish realistic bases for the initial evaluation. In order to be able to carry out this experimental phase, we proceeded to limit the analysis to the area of the nineteenth-century urban expansion of the city of Donostia-San Sebastian, characterized by its eclectic architecture and as a representative pattern of a big part of the surrounding heritage building. The first step was to evaluate the air tightness of a sample of representative buildings, as this one is one of the main parameters that mark the energy losses in the area of study. A total of 37 "door-fan" tests were carried out in order to capture the degree of tightness of the sample of buildings cataloged with different types of use and state of conservation.

Then, taking into consideration the wall of the main façade as the most notorious elements of the thermal envelope, a thermal analysis of them was carried out. In the first place, the experimental thermal characterization of the predominant stone materials in these construction elements, sandstone and limestone, was performed through thermal conductivity tests. Once the properties of these main elements were assessed, evaluations based on the energy simulation of heat transport were carried out in order to develop a global thermal characterization of the walls. Due to the great diversity of the walls in function of their thickness and thermal properties of the materials, a parametric simulation model was developed. This allowed obtaining the thermal response pattern taking into account these variations. In addition, a model has been developed capable of adjusting the results obtained in the parametric

simulations by means of the regression-adjustment method. Using this it is possible to know in a fast way the thermal behavior of this type of walls.

On the other hand, the logical limitations imposed on this building typology, such as the protection measured for the building heritage, mean that the external action on the envelope is very restricted. As a consequence, this thesis addresses the detailed evaluation of Interior Thermal Insulation Composite Systems (ITICS) as a non-intrusive measure for the reduction of thermal losses through the opaque part of the envelope. For this purpose, the one and two-dimensional modeling and simulation of the coupled heat and moisture transport in materials and construction components for the reference climatology has been carried out. Thus, it has been possible to develop a hygrothermal evaluation that has made it possible to identify and solve pathological processes that could be caused by non-contrasted interventions on the thermal envelope of buildings.

After establishing specific energy improvement solutions for the envelopes, it is necessary to quantify and calculate its effect at building level. That is why, through building energy simulations, different energy improvement scenarios have been evaluated through various intervention proposals. In this way, it has been possible to find the reduction heating energy demand that can be achieved in the evaluated building typology. At the same time, taking into account that the objective of reducing the heating energy demand can be achieved through different combinations, optimization models have been used making thus possible to detect those optimal interventions in relation to their cost-energy.

During the experimental phase it has been necessary to acquire specific knowledge in terms of instrumentation and data acquisition for further analysis. The current limitations in this field and the recent irruption in the market of new technologies and open communication protocols have harmonized a line of transdisciplinary research that has allowed to solve this situation. Thus, we have proceeded to implement fully functional self-developed equipment based on technologies such as the Open Source Platforms (OSP) and the Internet of Things (IoT).

It is concluded that although the measures proposed by the planned methodology do not allow achieving the same levels of high efficiency that can be achieved in modern buildings of new construction, the application of these can significantly improve the quality and comfort of heritage buildings. The improvements obtained through the reduction of energy consumption through passive measures and the improvement in thermal comfort, while preserving historic-artistic value, indicate that this building typology should not be relegated to the energy improvements regulations and may benefit the opportunities offered by the sector.



Keywords: Historic buildings, Built heritage, Energy efficiency, Airtightness, Blower Door Test, Internal thermal insulation composite system (ITICS), Hygrothermal performance, Building monitoring, Internet of Things, Open Source Platforms.

GAIEN AURKIBIDEA

Eskerrak	v
Laburpena	vii
Resumen.....	xi
Summary	xv
Gaien aurkibidea	xix
Nomenklatura.....	xxiii
Akronimoen zerrenda	xxv

Capítulo I

Binomio patrimonio edificado y eficiencia energética —Prefacio—	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. El sector de la edificación, la rehabilitación energética y el marco regulatorio	9
1.3. Patrimonio edificado.....	14
1.4. Binomio patrimonio edificado y eficiencia energética	20
1.5. Tesiaren egitura, helburuak eta egitura	26

II. Kapituluak

Ingurutzaille termikoaren hasierako diagnostikoa.....	31
2.1. Sarrera	33
2.2. Helmena eta helburuak.....	35
2.3. Metodologia.....	35
2.3.1. Kapituluaren egitura.....	35
2.3.2. Azterketa-eremuaren definizioa.....	36
2.4. Ingurutzaille termikoaren azterketa	39
2.4.1. Airearekiko estankotasunaren karakterizazioa.....	39
2.4.1.1. Sarrera	39
2.4.1.2. Helmena eta helburuak	42
2.4.1.3. Kasu-azterketen aukeraketa	43
2.4.1.4. Metodo esperimentalaren deskribapena	45
2.4.1.5. Emaizak eta eztabaida.....	51
2.4.1.6. Ondorioak	59
2.4.2. Opaku osagaiaren karakterizazioa.....	60
2.4.2.1. Sarrera.....	60
2.4.2.2. Helmena eta helburuak	64
2.4.2.3. Azterketaren metodoa	65
2.4.2.4. Emaizak eta eztabaida.....	76



2.4.2.5. Ondorioak	89
2.5. Ondorio orokorrak	90

III. Kapituluak

Inguratzaile termikoa esku-hartzearen xede gisa	95
3.1. Sarrera	95
3.2. Helmena eta helburuak.....	96
3.3. Metodologia.....	97
3.3.1. Kapituluaren egitura.....	97
3.3.2. Barne Isolamendu Termikoko Sistemen (BITS) materialen sarrera	98
3.3.3. Simulazio eredu.....	102
3.3.3.1. Zenbakizko eredu.....	102
3.3.3.2. Eredu konstruktiboa	104
3.3.3.3. Materialak eta propietateak.....	104
3.3.3.4. Muga-baldintzak	106
3.4. Emaizak eta eztabaida	108
3.4.1. Profil higrotermikoa	108
3.4.2. Egur usteltze arrisku azterketa	113
3.5. Ondorioak	114

IV. Kapituluak

Birgaitze energetikoen efektua eraikinen berokuntza-eskarian	117
4.1. Sarrera	119
4.2. Helemena eta helburuak	120
4.3. Metodologia.....	121
4.3.1. Kapituluaren egitura.....	121
4.3.2. Simulazio ereduaren definizioa.....	121
4.3.2.1. Ezaugarri konstruktiboak.....	123
4.3.2.2. Aireztapen eta berokuntza sistemak	125
4.4. Emaizak eta eztabaida	127
4.4.1. Eraikinaren jatorrizko energia eraginkortasun egoeraren azterketa	127
4.4.2. Proposatutako esku-hartzeen banakako hobekuntza azterketa	127
4.4.2.1. Isolamendu termikoaren efektua	129
4.4.2.2. Leihoen ordezkapena	131
4.4.2.3. Airearekiko estankotasunaren efektua	132
4.4.3. Eraikitako ondarearen birgaitze energetikoen esku-hartze konbinatuen opti- mizazio eredu.....	135

4.5. Ondorioak	142
----------------------	-----

V. Kapituluak

Eraikinak monitorizatzeko tresnak	145
5.1. Sarrera	147
5.1.1. Eraikinen monitorizazioa	148
5.1.2. Gauzen Interneta	149
5.2. Helmena eta helburuak	150
5.3. Metodologia	151
5.3.1. Kapituluaren egitura	151
5.3.2. Prototipoaren garapena	152
5.3.3. Sentsoreen kalibraketa	157
5.3.4. Azterketa kasua	158
5.4. Emaizak eta eztabaida	159
5.4.1. Emaizta orokorrak eta egiaztapena	160
5.4.2. Sentsoreen emaitza konparatiboak	164
5.4.3. Prototipoaren analisisa	166
5.5. Ondorioak	170

VI. Kapituluak

Ondorioak, ekarpenak eta etorkizuneko ikerlanak	173
6.1. Ondorio nagusiak	175
6.2. Etorkizuneko ikerlanak	178
6.3. Ekarpak	180
6.3.1. Nazioareteko aldizkariak	180
6.3.2. Aldizkari nazionalak	180
6.3.3. Nazioarteko kongresuak	181
6.3.4. Kongresu nazionalak	181
6.3.5. Jardunaldi teknikoak	182

Bibliografía	183
---------------------------	------------

Eranskinak	199
-------------------------	------------

8.1. Fundamentos de transporte de humedad en materiales y componentes de construcción	201
8.1.1. Almacenamiento de humedad en materiales de construcción	204
8.1.2. Mecanismos de transporte de humedad	207



8.1.3. Condiciones de contorno y focos de humedad.....	215
8.2. Códigos desarrollados	221
8.2.1. Equipo de conductividad térmica.....	221
8.2.2. Equipo de monitorización de edificios IoT.....	226
8.3. Base de datos de precios de las intervenciones de rehabilitación energética.....	232
8.4. Contribución	237

NOMENKLATURA

Letra erromatarrak

A_f	Markoen azalera	(m^2)
A_g	Beiren azalera	(m^2)
A_L	Aire ihesen baliokide-azalera	(m^2)
A_w	Xurgapen koefizientea	$(kg/m^2s^{0.5})$
C_c	Kalibrazioko aire-iragazpen koefizientea	$(m^3/h Pa^n)$
C_{env}	Aire-emari koefizientea	$(m^3/h Pa^n)$
C_L	Aire-iragazpen koefizientea	$(m^3/h Pa^n)$
D_ϕ	Likido gidatzeko koefizientea	$(kg/m s)$
D_w	Garraio koefiziente kapilarra	(m^2/s)
g_v	Ur-lurrun fluxua	$(kg/m^2 s)$
g_w	Ur-likidoaren fluxua	$(kg/m^2 s)$
G	Ur-lurruneko fluxua laginaren bidez	(kg/s)
h_v	Ur lurruntze-entalpia	(J/kg)
K_1	Iragazkortasun koefizientea	$(kg/m s Pa)$
K_2	Kapilar eroapen koefizientea	$(kg/m s Pa)$
n	Aire-emari esponentea	$(-)$
n_c	Kalibrazioko aire-emari esponentea	$(-)$
$n_{\Delta p}$	Aire aldaketa-tasa	(h^{-1})
N_o	Batez besteko urteko infiltrazio-ihes ratioa	$(-)$
p_{sat}	Ur-lurrunaren saturazioa presioa	(Pa)
P_k	Xurgatze presio kapilarra	(Pa)
P_n	Presio atmosferiko normala	(Pa)
q	Bero-fluxu dentsitatea	(W/m^2)
$q_{\Delta p}$	Aire iragazkortasuna	$(m^3/h m^2)$
R_c	Erresistentzia termikoa	$(m^2 K/W)$
R_o	Tentsio-zatitzaile erresistentziaren erreferentzia balorea	(Ω)
R_T	Neurtutako erresistentzia	(Ω)
RD	Ur-lurrunaren gas konstantea	$(J/kg K)$
S_w	Hezetasun iturria	$(kg/m^3 s)$
T	Tenperatura absolutu	(K)
U	Batez besteko haize abiadura	(m/s)
U_w	Leihoen transmitantzia termikoa	$(W/m^2 K)$
U_g	Beiren transmitantzia termikoa	$(W/m^2 K)$
U_f	Markoen transmitantzia termikoa	$(W/m^2 K)$
$V_{\Delta p}$	Iragazitako airearen tasa	(m^3/h)
w	Hezetasun edukia	(kg/m^3)



w_{80}	Hezetasun eduki praktikoa	(kg/m ³)
w_{max}	Hezetasun eduki maximoa	(kg/m ³)
w_{sat}	Saturazio hezetasun eduki kapilarra	(kg/m ³)
$w_{\Delta p}$	lhes-tasa espezifikoa	(m ³ /h m ²)
W	Ur-lurrun permeantzia ur-lurrun presio partzialari dagokionez	(kg/m ² s Pa)
Z	Ur-lurrunarekiko erresistentzia ur-lurrun presio partzialari dagokionez	(m ² s Pa/kg)

Letra grekoak

α_c	Konbekzio koefizientea	(W/m ² K)
β_v	Ur-lurrun transferentzia koefizientea	(kg/m ² sPa)
δ_a	Airearen ur-lurrun iragazkortasuna	(kg/ms Pa)
δ_p	Ur-lurrunaren iragazkortasuna	(kg/ms Pa)
ΔT	Tenperatura-diferentzia	(°)
Δp	Presio-diferentzia	(Pa)
θ	Kontaktu angelu estatikoa	(°)
λ	Eroankortasun termikoa	(W/m K)
μ	Ur-lurrun difusioaren erresistentzia faktorea	(-)
σ	Uraren gainazal-tentsioa	(N/m)
ϕ	Fluxu termikoa	(W)
φ	Hezetasun erlatiboa	(%)
ψ_g	Beira, hutsunea eta markoa eragindako transmitantzia termiko lineala	(W/m K)

AKRONIMOEN ZERRENDA

ACH	Air Changes per Hour
ADC	Analog to Digital Converter
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BAK	Barneko Airearen Kalitatea
BDT	Blower Door Test
BITS	Barruko Isolamendu Termikoko Sistema
CEN	Comité Europeo de Normalización
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático
COP	Conference of the Parties
EKKL	Eraikuntzako Kalitatearen Kontrolerako Laborategia
EKT/CTE	Eraikuntzako Kode Teknikoa / Código Técnico de la Edificación
ELA	Equivalent Leakage Area
EPS	Poliestireno hedatua (Expanded Polystyrene)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GI	Gauzen Interneta
H	Ur uxagarri
HAM	Bero, Aire eta Hezetasun (Heat, Air and Moisture)
I ² C	Inter Integrated Circuit
IIP	Iturburu Irekiko Plataformak
IKA	Isolamendu Kapilar Aktiboa
IKT	Informazio eta Komunikazioaren Teknologiak
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
KITS	Kanpoko Isolamendu Termikoko Sistema
LAA	Lurrun Atzeratzaile Adimentsua
LBL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LDB	Lurrun Difusio Barrera
M2M	Makina-Makina (Machine to Machine)
ML	Masa Galera (Mass Loss)
MW	Artilezko isolamendua (Mineral Wool)
NTC	Negative Temperature Coefficient
OLED	Organic Light-Emitting Diode
OTA	Over-the-air
PID	Proportional-Integral-Derivative
PWM	Pulse-Width Modulation



REHVA	Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations
SCL	Serial Clock
SD	Secure Digital
SDA	Serial Data
SICB	Azpiegitura, eraikuntza eta eraikin adimentsuak (Smart Infrastructures, Constructions and Buildings)
SSR	Solid State Relay
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
WTA	Wissenschaftlich-technische arbeitgemeinschaft für bauwerkserhaltung und denkmalpflege

I. Kapituluua

Capítulo I

Eraikitako ondarearen eta
energia eraginkortasunaren
binomioa —Hitzaurrea—

Binomio patrimonio
edificado y eficiencia
energética —Prefacio—



Laburpena:

Eraikitako ondarea azken urteotan kezkarik handienetariko bat bihurtu da. Alde batetik, eraikin historikoak hirien nortasuna eta historiaren lekuko izatea sustatzen laguntzen dute, kulturaren eta gizartean duten eragina edozein eztatanda haratago dago. Bestalde, eraikuntzako energiaren kontsumo murrizketa eta erosotasunari buruzko egungo eskakizunak kontuan hartuta, eraikitako ondarearen eraginkortasun energetikoan egindako inbertsioak erronka handia eta hiriaren garapen iraunkorraren aldeko aukera bihurtu dira. Kapitulu honek aurkezpen gisa ikerkuntza gaiaren arte egoera erakusten du, era honetan Tesiaren garapenaren arrazoiak izan diren hutsuneak detektatu izan dira.

Resumen:

El patrimonio edificado se ha convertido en una de las mayores preocupaciones en los últimos tiempos. Por un lado, los edificios históricos contribuyen a mantener la identidad urbana y como testigos de la historia, su impacto en la cultura y en la sociedad está más allá de cualquier discusión. De otra parte, teniendo en consideración los requisitos actuales de confort y limitación del consumo energético de los edificios, las inversiones en eficiencia energética sobre el patrimonio edificado se han convertido en un gran desafío y en una oportunidad para la sostenibilidad del desarrollo urbano. El presente capítulo muestra a modo introductorio el estado del arte de la temática, permitido detectar así ciertas lagunas que han propiciado el desarrollo de la Tesis.

1. Antecedentes/Contexto

Durante el siglo XX la generación de energía a partir de combustibles fósiles se desarrolló muy rápidamente debido a su bajo coste económico. No obstante, la situación cambió drásticamente como consecuencia de las crisis del petróleo que se produjeron en los años 1973 y durante 1979 y 1980. Este hecho conllevó a que las políticas de eficiencia energética fueran tomando mayor relevancia en países con una alta dependencia energética y que conllevaba a una situación de vulnerabilidad producida por las grandes fluctuaciones de la demanda de combustible y por lo tanto de sus precios.

Informes como los del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [1] han mostrado las variaciones que se están produciendo mediante los distintos indicadores ambientales y además, a través de los múltiples escenarios planteados, presagian variaciones sustanciales de dichos valores en los próximos años, Figura 1. 1.

Según el informe realizado por Stern [2] en los próximos 10-20 años las inversiones que se efectúen tendrán una alta repercusión en el clima durante los próximos años. El mismo informe indica que los costes para mantener unos niveles estables de GEI entre 500-550 ppm de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ supondrán un 1% del PIB global anual. De acuerdo con el informe, en caso de inacción, los costes en el futuro inmediato serían mucho más elevados suponiendo al menos un total del 5% del PIB mundial anual y pudiendo llegar hasta el 20%. Además el autor recalca que los desafíos que conlleva la transición hacia una economía baja en carbono traerán consigo nuevas oportunidades para el crecimiento ya que se requerirán nuevas políticas que apoyen el desarrollo de tecnologías de alta eficiencia energética y baja emisión de carbono.

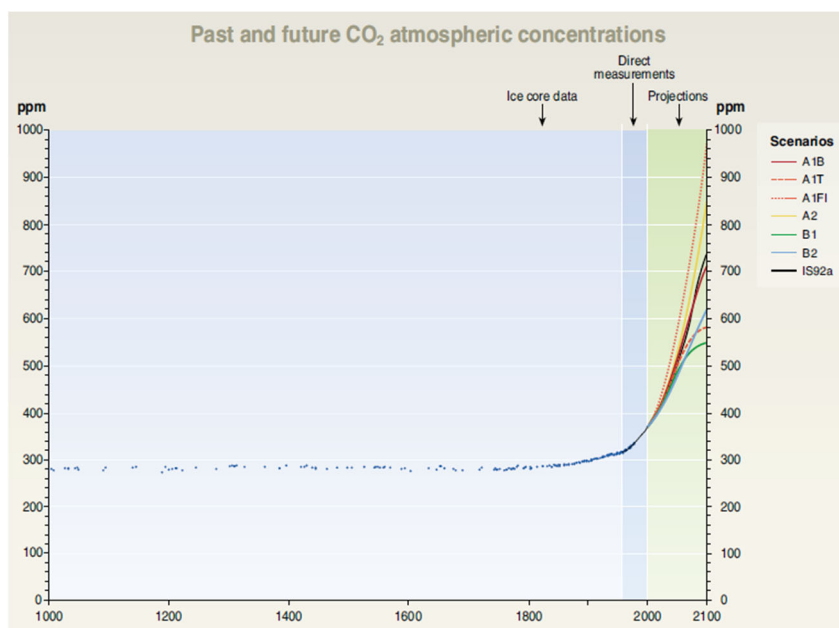


Figura 1. 1.-Evolución de la concentración de CO₂ y escenarios de futuro.

Esta situación de inestabilidad medioambiental y económica condujo al desarrollo de tratados internacionales con el objeto de dar solución y mitigar los efectos que se estaban produciendo. Desde la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro en 1992 que dio origen poco después al Protocolo de Kyoto [3] a través de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). Los países que ratificaron dicho protocolo, se comprometieron que para el periodo 2008-2012 reducirían al menos un promedio del 5% la tasa de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) respecto a los niveles de 1990, estableciendo un reparto de cargas a los países integrantes.

A nivel europeo y dentro de este marco, se han ido desarrollando herramientas con el objetivo de desarrollar nuevos modelos de transición energética basados en el fomento del ahorro energético y el uso de energías renovables. Entre ellas podemos destacar estrategias como la que se persiguen con el Libro Verde sobre la estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético [4]. En él, la Comisión invita a los Estados miembros a desarrollar una política energética basada en tres objetivos principales. Por un lado, la sostenibilidad, mediante el fomento de la eficiencia energética y las energías renovables para hacer frente al cambio climático y sus efectos sobre los ecosistemas y economías de todos los países. Por otro lado, la competitividad y la seguridad del abastecimiento energético. El documento presta vital importancia a la necesidad de mejorar la competitividad de la energía autóctona ya que de no ser así, en los próximos 20-30 años, como consecuencia del aumento de la demanda de energía, el 70% de las necesidades energéticas se deberán de satisfacer

mediante productos importados. Además, los precios del petróleo y el gas son también un aspecto preocupante para la UE debido a que han duplicado su precio, siguiendo la electricidad una tendencia similar. Por todo ello, el Libro contempla seis sectores prioritarios de intervención:

- La implantación del mercado interior de energía para evitar que la dominación de algunas empresas tradicionales puedan penalizar a los consumidores mediante los altos costes de la energía. De esta manera se permite que el usuario pueda escoger entre distintos proveedores existentes en Europa.
- La seguridad del abastecimiento mediante la solidaridad entre los Estados miembros mediante el desarrollo de un observatorio europeo que vele por aquellos países que puedan sufrir crisis de abastecimiento.
- La búsqueda de una combinación energética global sostenible, eficiente y diversificada y que permita a los Estados miembros escoger la estrategia que mejor se adecúe según sus fuentes de energía disponibles pudiendo coordinarse a escala europea mediante la Revisión estratégica de política energética de la UE.
- Establecer un enfoque integrado de lucha contra el cambio climático disociando el crecimiento económico del consumo energético mediante el fomento de la eficiencia energética y las energías renovables.
- La investigación e innovación como instrumento de apoyo para el desarrollo de nuevas tecnologías.
- El desarrollo de una política energética exterior coherente mediante la revisión estratégica de la política energética común de la UE y la propuesta de integración de los mercados de la UE y países vecinos.

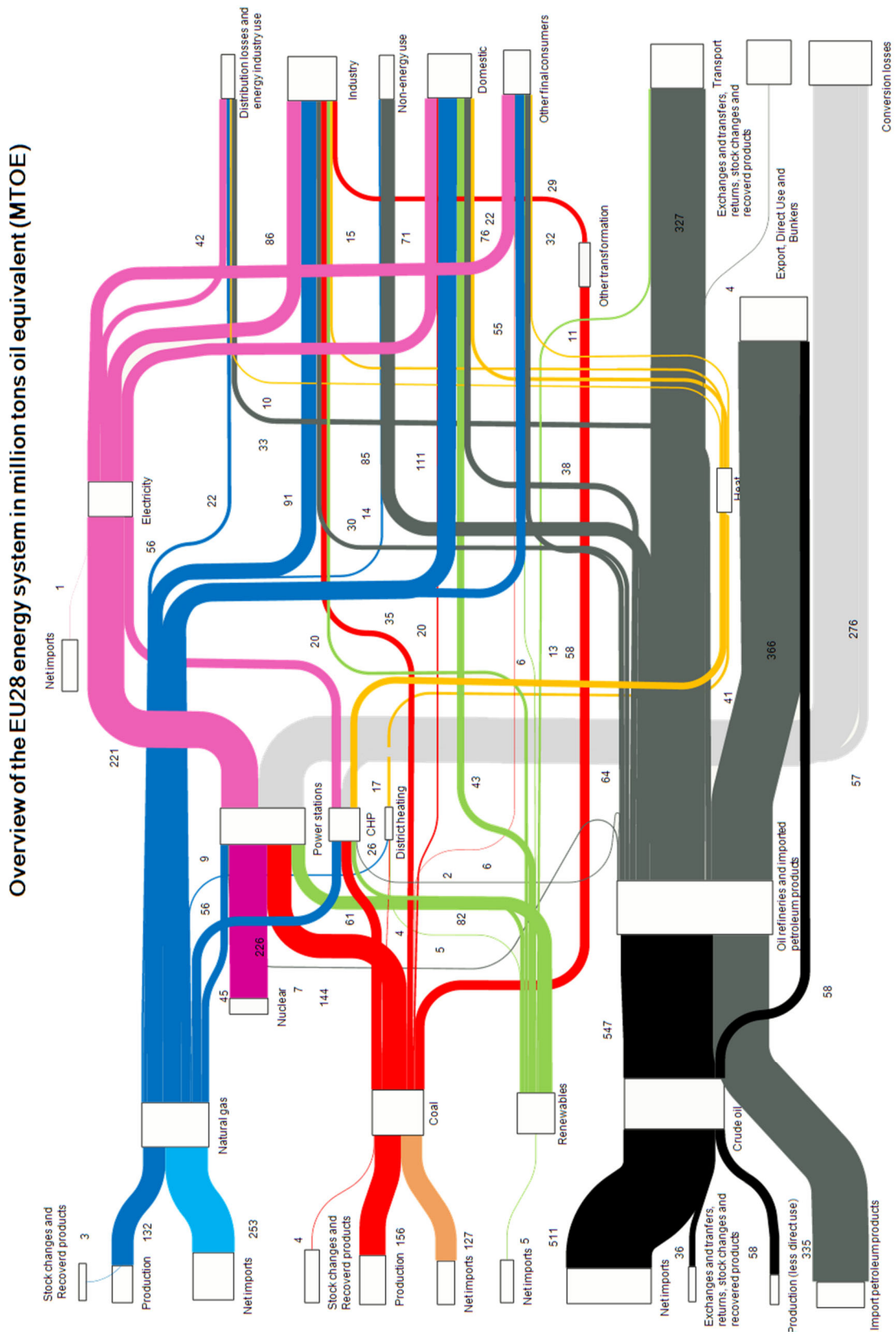


Figura 1. 2.-Diagrama Sankey del sistema de energético de la Unión Europea [5].

Siguiendo dicha estrategia energética, se han ido proponiendo una serie de objetivos a lo largo de diferentes periodos en las que los Estados Miembros se comprometían en cumplir. Dicho marco ha ido actualizándose a lo largo de diferentes periodos para poder fijar así cada vez objetivos más ambiciosos.

Durante el primer periodo que corresponde al 2008-2012, Europa se comprometía a reducir un 8% la emisión de gases de efecto invernadero respecto al año base 1990 para cumplir así los acuerdos del Protocolo de Kioto [3]. Para ello, y de acuerdo con el artículo 4 del Protocolo, los EM realizaron un reparto interno de dichos porcentajes que permitía cumplir de manera conjunta el objetivo marcado. De esta manera, cada EM debía cumplir un objetivo diferente.

El segundo periodo 2013-2020 corresponde a los objetivos marcados en el Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático. Sus objetivos principales son la reducción del 20% de los GEI respecto a los niveles de 1990, el aumento del 20% de las energías renovables y la mejora del 20% de la eficiencia energética. Con ellos se consigue dar continuación al Protocolo de Kioto a través del nuevo Acuerdo de Doha (COP18).

El tercer periodo, 2020-2030, Marco de Políticas de Energía y Cambio Climático 2021-2030 40% GEI, 27% RES, EE entre el 27-30% y 15% de interconexión eléctrica. De esta manera, se cubrieron los acuerdos realizados en la Cumbre de Paris (COP21) el 22 de enero de 2014 cuyo objetivo fue establecer un plan de acción global para limitar el aumento de temperatura media muy por debajo de los 2°C sobre los niveles preindustriales.

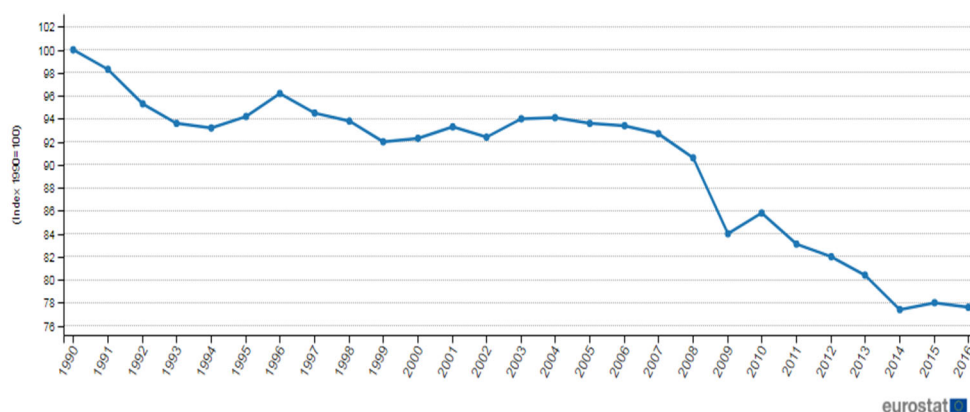


Figura 1. 3.-Evolución de las emisiones totales de gases de efecto invernadero de la UE en comparación con 1990 [6].

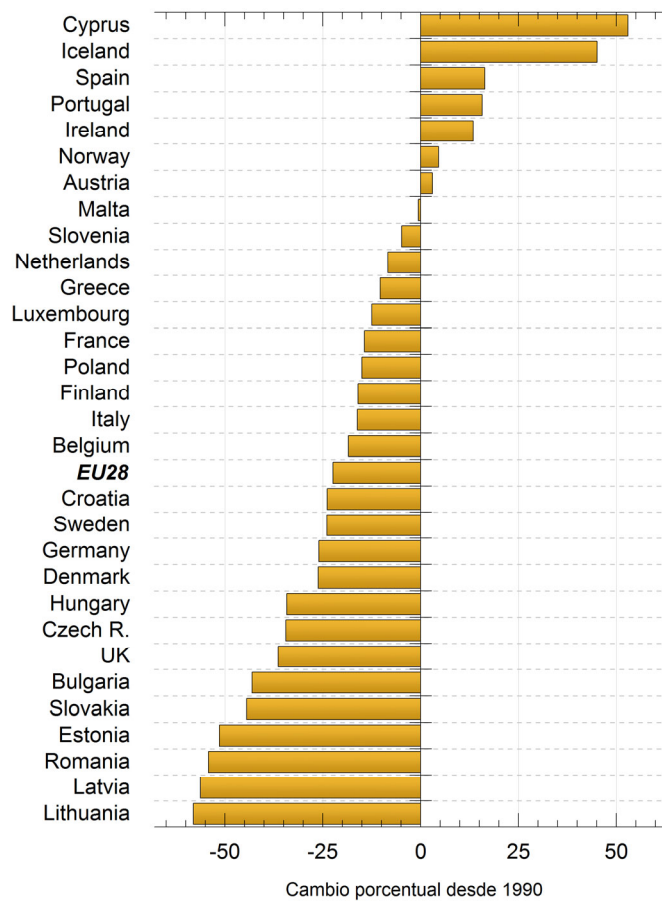


Figura 1. 4.-Variación porcentual de las emisiones de GEI de los EM de la UE en el año 2016 en comparación con 1990 [7].

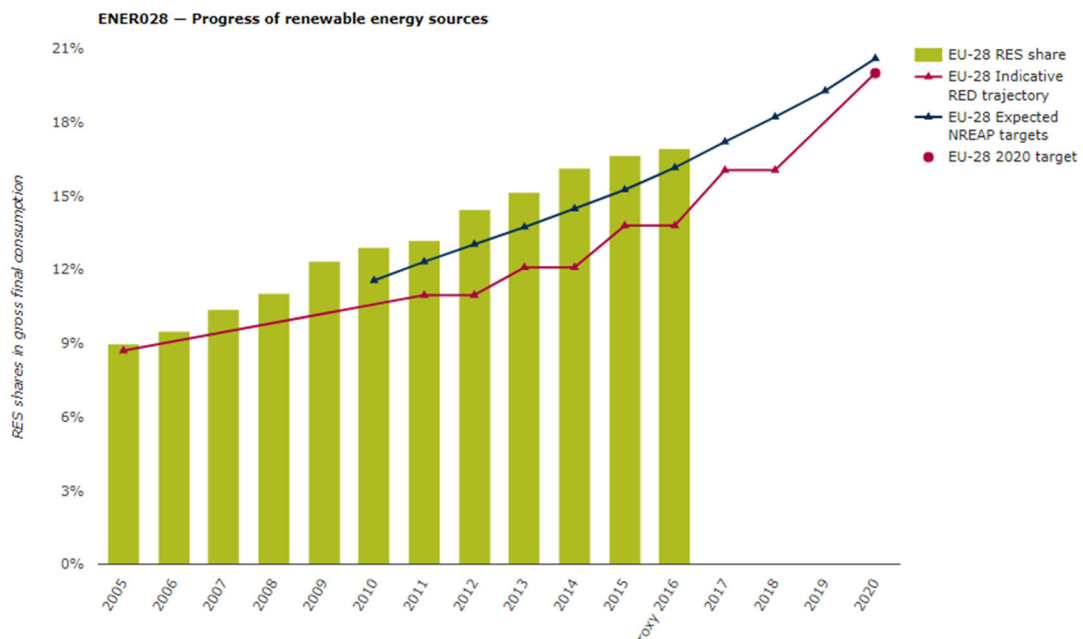


Figura 1. 5.-Proporción de las fuentes de energía renovables de la UE por años [7].

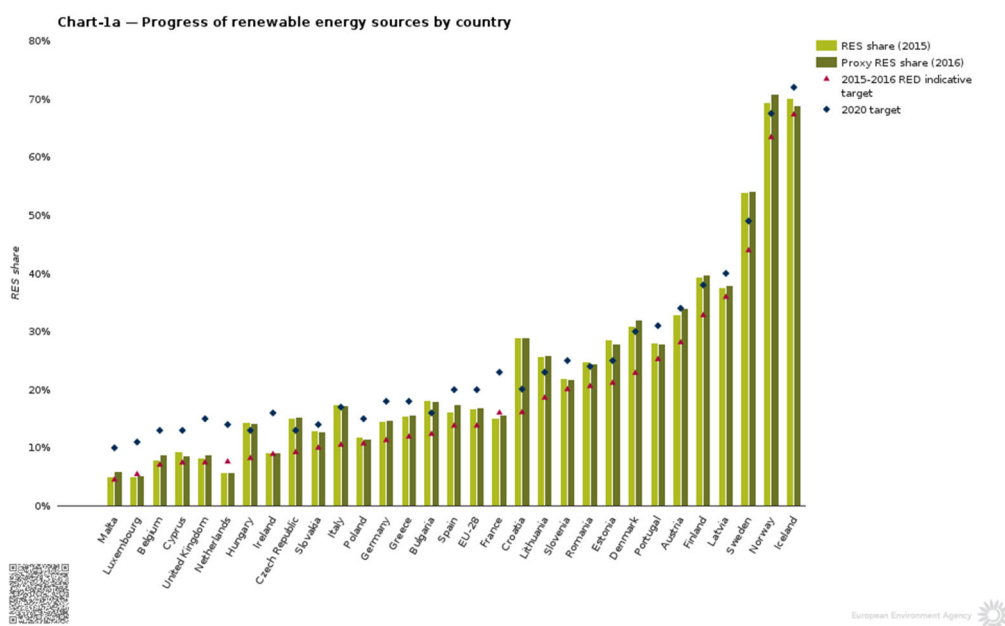


Figura 1. 6.- Proporción de las fuentes de energía renovables de los EM de la UE durante el año 2016 y los respectivos objetivos marcados para el año 2020 [7].

2. El sector de la edificación, la rehabilitación energética y el marco regulatorio.

A mediados del siglo XIX, las ciudades vivieron una rápida expansión para dar respuesta a la gran demanda de vivienda. Dicha necesidad se produjo como consecuencia del desarrollo industrial de las urbes que atrajeron a una gran cantidad de personas procedentes de entornos rurales. Este crecimiento urbanístico se vio incrementado a mediados del siglo XX por la reconstrucción y el segundo período de industrialización en la época de la posguerra. Como resultado, las ciudades que hoy conocemos se caracterizan por expandirse rápidamente por el territorio fomentando así el modelo de la ciudad difusa [8], lo que conlleva a reconsiderar el modelo actual de desarrollo hacia uno más sostenible [9].

Esta situación tiene como resultado que el sector de la edificación, Figura 1. 7, es el responsable del 40% del consumo de energía final y por lo tanto, su mejora puede contribuir a lograr los objetivos energéticos [10]. En 2009, el 68% de la energía final empleada en los edificios de Europa fue consumida por los hogares. Este consumo energético en las viviendas se debe a la refrigeración de espacios, al agua caliente sanitaria, cocina y los electrodomésticos, no obstante el consumo predominante se produce por la calefacción de los espacios que es el responsable del 70% del consumo en las viviendas [11], Figura 1. 8 y Figura 1. 9.

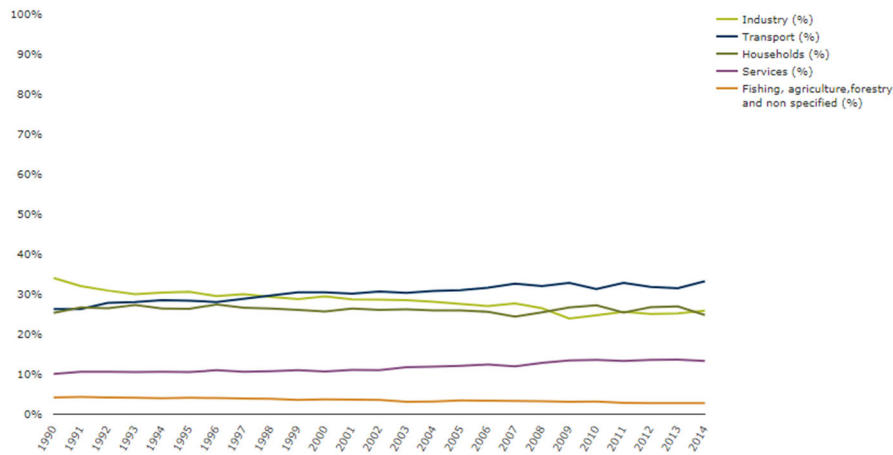


Figura 1. 7.- Distribución del consumo de energía final por sector [12].

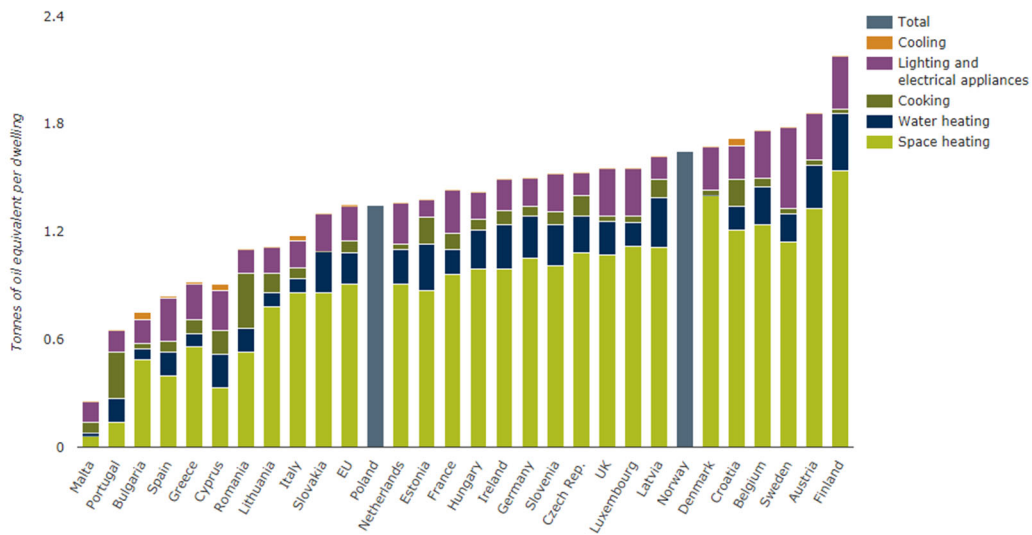


Figura 1. 8.- Consumo de energía por uso final de las viviendas [13]

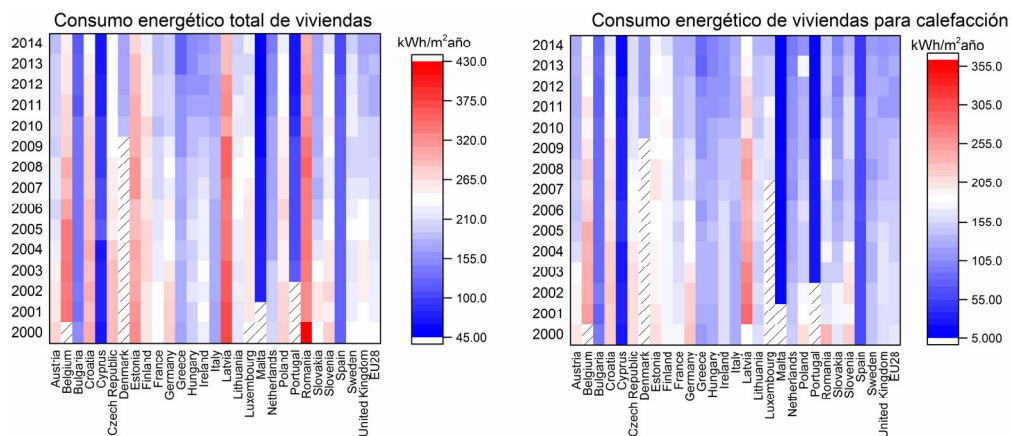


Figura 1. 9.-Consumo energético de las viviendas en Europa [14].

Los nuevos edificios pueden construirse bajo criterios energéticamente eficientes, sin embargo, la tendencia de crecimiento de estos edificios se ha visto mermada como consecuencia del impacto de la crisis financiera del sector [11], Figura 1. 10. Por lo

tanto, el ámbito de acción se encuentra bajo los edificios existentes. Un tercio de los edificios residenciales se construyeron antes de 1960, y casi el 84% tienen al menos 20 años [15], Figura 1. 11. Teniendo en consideración que la edad de los edificios es un claro indicador de su consumo de energético [16], la renovación de la envolvente de los edificios, Figura 1. 12, a los estándares actuales supone una gran oportunidad para el ahorro energético y la reducción de emisiones de CO₂. Además, este tipo de intervenciones permitirían amortiguar el efecto de subida de precios de la energía, Figura 1. 13, al mismo tiempo que se conseguiría hacer frente a los problemas derivados de dicho coste energético y al estado de conservación de los propios edificios, Figura 1. 14.

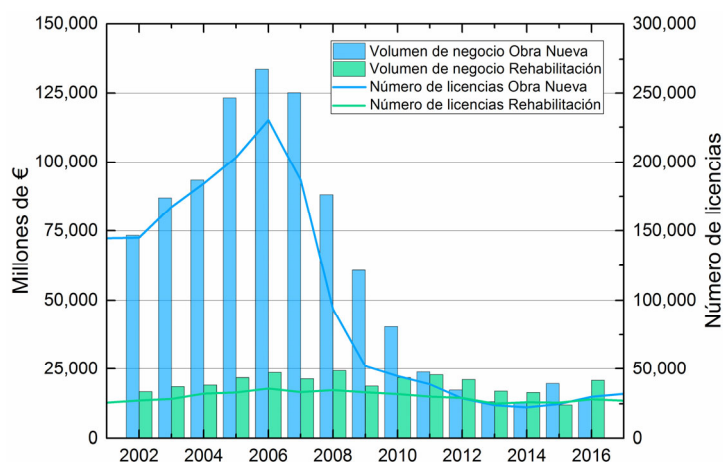


Figura 1. 10.-Número de licencias municipales y volumen de negocio de edificios residenciales de obra nueva y rehabilitación en España [17].

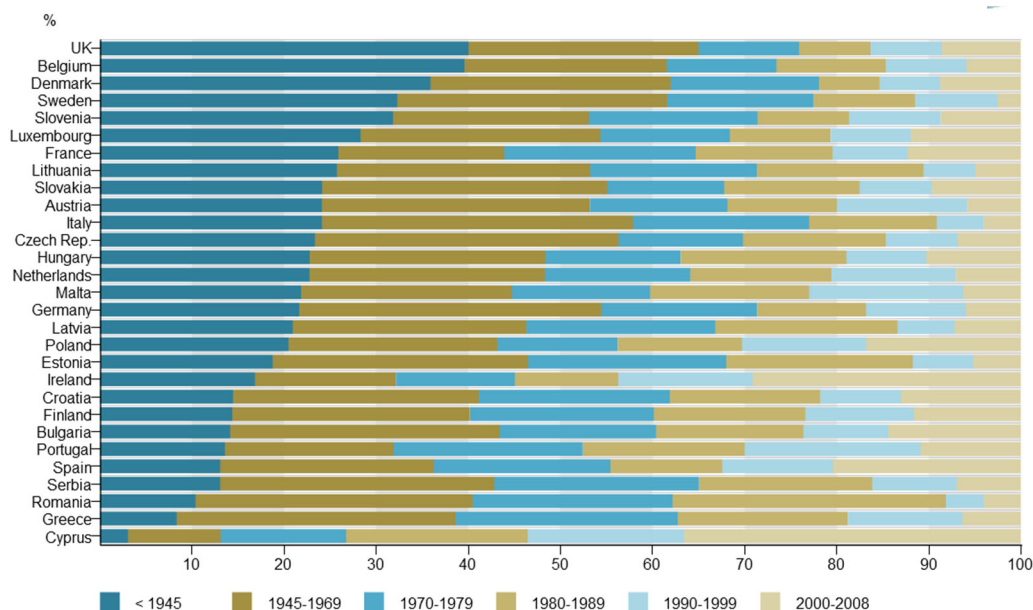


Figura 1. 11.-Distribución del parque inmobiliario de viviendas según el periodo de construcción [18].

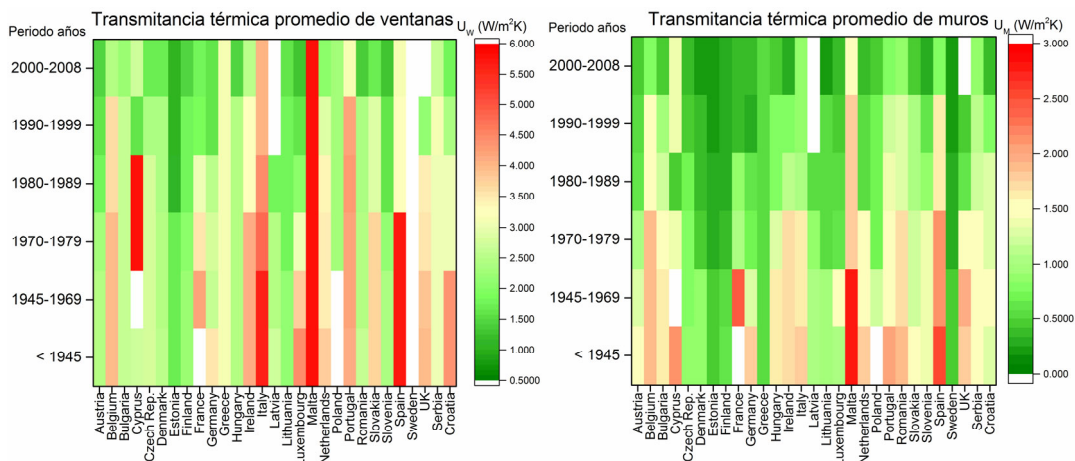


Figura 1. 12.-Transmitancia térmica promedio de muros y carpinterías según periodo de construcción de edificios residenciales [14].

En esta parte seguir la copla del informe ERESEE2017

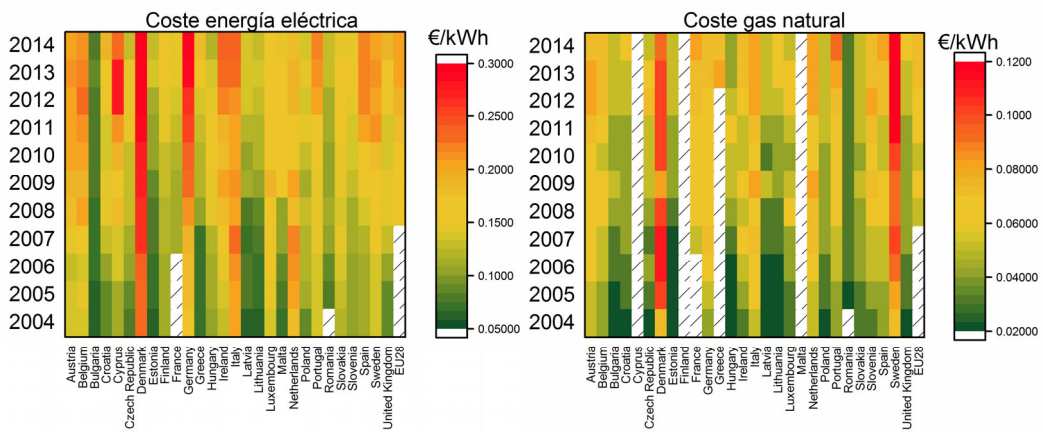


Figura 1. 13.-Precio promedio de la energía eléctrica y del gas natural en las viviendas de los países de la UE [14].

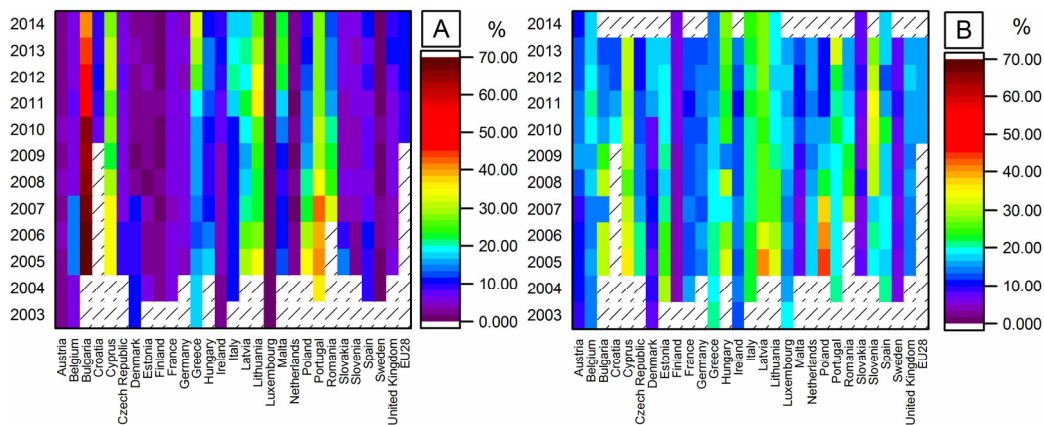


Figura 1. 14.-Indicadores de pobreza energética de los países de la UE. (A: Porcentaje de la población incapaz de mantener su hogar a una temperatura adecuada en invierno. B: Porcentaje de la población cuyas viviendas tiene fugas en cubiertas, humedad o podredumbre en ventanas o forjados.) [14].

Fruto de toda esta situación en la que se evidencia que el sector de la edificación, es uno de los mayores responsables del panorama energético, se desarrolló la directiva europea 2002/91/CE [19] relativa a la eficiencia energética en los edificios con el fin de instaurar acciones concretas de ahorro energético. El objetivo de dicho documento es el de fomentar la eficiencia energética de los edificios, teniendo en cuenta las condiciones climáticas exteriores y las particularidades locales, así como los requisitos ambientales interiores y la relación coste-eficacia. Para ello la Directiva establece una serie de requisitos en relación con:

- El marco general para la metodología integrada de cálculo de la eficiencia energética de los edificios.
- Los requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios nuevos y de grandes edificios existentes que sean objeto de reformas importantes.
- La certificación energética de los edificios.
- La inspección periódica de calderas y sistemas de aire acondicionado de edificios y la evaluación del estado de la instalación de calefacción con calderas de más de 15 años.

Posteriormente dicha directiva fue modificada mediante la DIR 2010/31/UE [10] para poder alcanzar el objetivo marcado de reducción del 20% de emisiones de GEI y del consumo energético para el año 2020.

Además, recientemente ha sido publicada [20] la nueva Directiva que modifica la DIR 2010/31/UE y la DIR 2012/27/UE con el objetivo de cumplir los compromisos de reducción de al menos un 40% de los GEI para el año 2030 en comparación con los niveles de 1990. Dicha Directiva, siguiendo los nuevos pasos que se están tomando hacia la digitalización del sector de la construcción, presta vital importancia en el uso de la Tecnologías de la Información y de la Comunicación (TIC) como método de ahorro energético donde la automatización, control y monitorización de los edificios se convierten en herramientas clave. La propuesta presta vital relevancia a siguientes temas:

- Insta a cada Estado miembro a elaborar estrategias a largo plazo para la renovación del parque edificatorio residencial y no residencial, tanto público como privado, para transformarlos en edificios de alta eficiencia y descarbonizados antes de 2050. Para ello cada Estado deberá de establecer una hoja de ruta a corto, medio y largo plazo con el objetivo final de reducir los GEI en la Unión en un 80-95% para el año 2050 en comparación con 1990.
- Promover las instalaciones técnicas con el objeto de convertirlas en aptas para aplicaciones inteligentes y soluciones digitales en el entorno construido



mejorando así el ahorro energético a través de la información precisa mostrada a los usuarios sobre los patrones de consumo.

- Se propone un indicador de aptitud para aplicaciones inteligentes para medir la capacidad de los edificios de usar las TIC y lograr así mejorar la eficiencia energética de los edificios. Su objetivo es sensibilizar a los usuarios sobre el valor que aporta la automatización de los edificios y el seguimiento electrónico de sus instalaciones para inspirar confianza sobre los ahorros reales obtenidos a través de dicha tecnología.
- Fomentar la instalación de puntos de recarga para electromovilidad en actuaciones de obra nueva como en reformas importantes, tanto en edificaciones residenciales como en las no residenciales.
- Se insta a fomentar la investigación y el ensayo de nuevas soluciones capaces de mejorar la eficiencia energética de los edificios históricos garantizando a su vez la protección y la conservación del patrimonio cultural.
- Solicita a los Estados miembros a adoptar medidas para establecer inspecciones periódicas de las instalaciones de calefacción, refrigeración y ventilación de más de 70 kW.
- Además insta a antes del 2025 a que las instalaciones de calefacción o refrigeración (incluyendo ventilación) con potencias superiores a 290 kW estén equipados con sistemas de automatización y control capaces de monitorizar, registrar, analizar en consumo de energía siendo a su vez interoperables con el resto de instalaciones del edificio. En edificación residencial serán los Estados miembros quienes decidan su aplicación.

3. Patrimonio edificado

El Patrimonio, entendido como el conjunto de bienes heredados del pasado, siempre ha sido de gran interés para la sociedad. La identidad, los valores, la repercusión sobre su entorno o su soporte a la memoria histórica son entre otros, algunos de los aspectos por los que existe un interés para su protección.

A lo largo de los años se han ido desarrollado diferentes movimientos y teorías sobre los que se han basado las intervenciones realizadas en el Patrimonio. Es en el siglo XVII cuando se desarrolla una conciencia de valor artístico e histórico de los monumentos y se comienzan a plantear las Teorías de la Restauración. A continuación se procederá a presentar de una manera concisa las distintas teorías que se han desarrollado a lo largo de los años en esta materia con el fin de poder presentar los conceptos generales sobre la intervención del patrimonio edificado.

- **Restauro Archeologico:** considerada la primera teoría de la restauración, tiene su origen en Italia en el siglo XVIII con los primeros descubrimientos arqueológicos de Herculiano (1711) y Pompeya (1748) y cuando se dio el desarrollo de la conciencia del valor artístico e histórico de los monumentos. Rafaele Stern (1774-1820) y Giuseppe Valadier (1762-1839) fueron los representantes de este movimiento con ejemplos como el Coliseo Romano o el Arco de Tito. Esta teoría se basa en la restauración y consolidación de las ruinas arqueológicas. Una de sus características más notorias era la de marcar claramente la parte nueva de la existente mediante el empleo de materiales distintos.



Figura 1. 15.- Coliseo romano. Trabajo de restauración de G. Valadier.

- **Restauro Stilístico:** tras la Revolución Francesa y para dar solución al precario estado de múltiples monumentos como consecuencia de la destrucción que se había producido y poder recuperar así el esplendor se produjeron las primeras restauraciones. No obstante, las mismas se realizaron de una manera rápida, con escasos conocimientos y sin una regla a seguir produciéndose así unos resultados fatales sobre la arquitectura. Fruto de ello, surgió esta nueva teoría que más que en la conservación, se basaba en la restauración del edificio tal y como fue en estilo. El arquitecto y arqueólogo francés Eugène Viollet-le-Duc (1814-1879), fue una de las figuras clave de este movimiento. Entendía que el restaurador debía de ponerse en la piel del arquitecto original para recuperar así el carácter inicial del edificio, es decir lograr la *forma prístina*. Añade además la necesidad de eliminar aquellas partes arquitectónicas y decorativas agregadas en épocas posteriores para poder lograr la unidad original y la pureza estilística. Críticos de esta teoría indican que este movimiento como desafortunado por ser el responsable de que se hayan producido los *falsos históricos* o *falsos arquitectónicos* quedando así desnaturalizadas las obras.



"Restaurar un edificio no significa conservarlo, repararlo o rehacerlo, sino obtener su forma prístina, incluso aunque nunca hubiera sido así. Es necesaria una discreción religiosa, una renuncia completa a toda idea personal, y en los problemas nuevos, cuando se deban añadir partes nuevas aunque no hayan existido nunca, es preciso situarse en el lugar del arquitecto primitivo y suponer qué cosa haría él si volviera al mundo y tuviera delante de sí el mismo problema

Eugène Viollet-le-Duc"

- **Movimiento antirestaurador:** es la corriente antagónica al Restauo Stilístico que tiene como objetivo la de preservar la obra originaria del creador. Movimiento representado por John Ruskin (1819-1900), defendía los valores históricos como los más importantes del edificio y criticaba la reconstrucción como método de restauración. La reconstrucción era entendida no sólo como una simple falsificación, era incluso una falsificación moral. Su propuesta se basaba en la restauración preventiva para buscar así la belleza romántica de la ruina. Apelaba a que un edificio es como un ser humano que nace, vive y debe de morir dignamente.

"Cuidad de vuestros monumentos y no tendréis necesidad de restaurarlos. Una hoja de plomo puesta a tiempo sobre un techo, la oportuna limpieza de algún trozo o detritus de madera que obstruye un conducto, podrá salvar de la ruina muros y cubierta. Vigilad con ojo atento un viejo edificio, conservadlo lo mejor posible con todos vuestros medios, salvadlo de cualquiera que sea la causa de disgregación (...). Hacedlo con ternura y respeto, vigilancia incesante y más de una generación nacerá y desaparecerá a la sombra de sus muros. Pero su última hora, al fin sonará; y que suene abierta y francamente, sin que ninguna sustitución deshonrosa y falsa lo prive de los deberes fúnebres del recuerdo.

John Ruskin"

- **Restauo Moderno:** nace como equilibrio entre el movimiento estilístico de Viollet-le-Duc y el movimiento antirestaurador de Ruskin. Condena las reconstrucciones arbitrarias del Movimiento Stilístico pero tampoco acepta la visión fatalista del fin del monumento de la corriente antirestauradora. El objetivo es manifestar el principio de honradez y respeto por lo auténtico y que la intervención sobre el monumento sea tan solo cuando sea ineludible. Consolidar antes que reparar, y reparar antes que restaurar. Camilo Boito (1836-1914), precursor del movimiento, defendía el doble valor que tiene el monumento como obra de arte y como documento histórico. En 1883 estableció los principios sobre los que debían de basar las intervenciones. Al igual que en el Restauo Archeológico, uno de los criterios fundamentales consiste en realizar una clara diferenciación de estilo entre lo nuevo y lo original además de la diferenciación de los materiales. La incisión de un signo en cada pieza colocada para indicar que se trata de una pieza nueva así como la colocación de un epígrafe descriptivo del edificio son también características primordiales de la teoría. También cobra importancia por un lado la exposición de restos o piezas que se hayan prescindido o eliminado y por otro lado la documentación y exposición del proceso de

restauración de las obras destacando a su vez el valor de lo auténtico y evidenciando la intervención realizada.

- Restauo Científico: Gustavo Giovannoni (1873-1947) siguió defendiendo y desarrollando las ideas de Boito pero centrándose más en la concepción de la restauración como una actividad científica. De ahí que defendiera la participación de múltiples expertos de distintas disciplinas con el fin de caracterizar el edificio y a través de los datos obtenidos elaborar una propuesta de intervención adecuada. Frente a la restauración subjetiva o intuitiva, basada en la experiencia, la restauración científica recurre a técnicas científicas de conocimiento y evaluación del elemento. Efectúa a su vez la distinción de los monumentos muertos, como restos arqueológicos o ruinas antiguas y que son imposibles de volverlos utilitarios, y vivos, monumentos que aún se pueden restaurar y pueden tener una función. Plantea a su vez la protección no sólo del monumento, sino que el entorno que lo rodea también. Por último hace una clasificación de las intervenciones a realizar en un monumento en cinco tipos: consolidación, recomposición, liberación, complementación e innovación.

Tras el desarrollo de las Teorías de Restauración se habían producido múltiples intervenciones subjetivas que obligaron a buscar una unificación de criterios en los procesos de restauración. Es por ello que, a partir del siglo XX se produjeron una serie de encuentros en los que se reunían especialistas sobre la materia para intentar sentar las bases a la hora de intervenir sobre el patrimonio. Las conclusiones de muchos de dichos encuentros eran el núcleo sobre el que se fundamentan las conocidas Cartas o Documentos de Restauración. Éstas a su vez han servido como base también para el desarrollo de las normas y leyes sobre la conservación e intervención del patrimonio a nivel nacional.

Cabe señalar, que con el objeto de ir respondiendo a las necesidades de cada momento, las Cartas y Documentos han ido evolucionando con el paso de los años. En un principio desde una atención única a elementos emblemáticos y monumentales (Patrimonio Arquitectónico), siguiendo por aumentar su alcance de protección atendiendo a casos como las arquitecturas menores o conjuntos de edificaciones (Patrimonio Edificado), y pasando por la necesidad de mantener tanto los entornos urbanos como su espíritu y sus habitantes.

En definitiva, el hecho del dinamismo del concepto de patrimonio implica comprender su grado de complejidad para hacer así frente a las circunstancias de cada momento y lograr así que el legado recibido del pasado y que se disfruta en el presente pueda ser transmitido a las futuras generaciones. El número de estos



Documentos o Cartas a día de hoy es elevado y debido a ello a continuación se pretende presentar las ideas principales de aquellos más trascendentes.

– Carta de Atenas para la restauración de los monumentos históricos (1931)

Es el primer documento internacional y por ello fundamental en el ámbito de la conservación y restauración del patrimonio cultural. Fue redactada como conclusión de la Conferencia de Expertos para la Protección y Conservación de Monumentos del Arte y de Historia. G. Giovannoni, continuador del pensamiento y doctrina de C. Boito, tuvo gran influencia en la redacción del documento dando como resultado principios fundamentales para la conservación de los bienes, entendidos como monumentos artísticos e históricos.

En primer lugar se defiende la labor de abandonar las restituciones integrales y evitar sus riesgos mediante las obras de mantenimiento regular aptos para asegurar la conservación. Además se aprueba el derecho de colectividad frente al interés privado con objeto de proteger los monumentos de interés. Otro de los apartados desarrollados, y quizás el más polémico, es la aprobación del empleo de materiales modernos, incluido el hormigón armado, para la consolidación de los monumentos siendo su uso debidamente disimulado para no alterar el aspecto y carácter original. También se atiende en el documento al especial cuidado del entorno urbano que se debe de tener en aquellos procesos de construcción de nuevos edificios para mantener así el carácter y la fisonomía de la ciudad especialmente en las cercanías de los monumentos antiguos. El último de los aspectos tratados radica en la importancia de educar en valores de conservación y respeto del patrimonio con el objeto hacer entender su significado y a su vez evitar estropear los monumentos.

– Carta internacional sobre la conservación y la restauración de monumentos y sitios. Carta de Venecia (1964)

Tras la finalización de la Segunda Guerra Mundial comenzó el periodo de la reconstrucción de las ciudades devastadas con objeto de devolver la identidad a los pueblos. En este proceso, peligraron los valores de algunos monumentos y que habían sido indicados a proteger por la Carta de Atenas. De esta manera se vio la necesidad de dar solución a la situación y de actualizar los contenidos de la Carta de Atenas. Como respuesta a ello, se celebró el II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de los Monumentos Históricos, que dio como resultado la fundación del ICOMOS y la aprobación de la Carta de Venecia.

La Carta de Venecia supone una actualización de la Carta de Atenas siguiendo la misma línea de conservación pero introduciendo nuevos conceptos y aumentando su alcance. Uno de los aspectos más relevantes que se añaden en este documento es que

ya no sólo las grandes creaciones deben de ser tenidas en consideración para su protección, se incluyen también aquellas obras modestas que han adquirido con el tiempo un significado cultural. El documento aborda los conceptos de conservación y restauración prevaleciendo el primero de ellos y añadiendo que la restauración debe de resultar de carácter excepcional. Además, claramente se indica que cuando exista un marco tradicional, éste será conservado y que cualquier nueva construcción, destrucción o arreglo que pueda alterar los volúmenes o colores será desechado. Se añade también que el propio monumento no puede ser separado de la historia de la que es testigo ni del lugar en el que está ubicado. También adquiere gran relevancia el proceso de documentación necesario en todo tipo de trabajos y en todas sus fases para que puedan ser consultados por investigadores. Dicha documentación deberá de ser depositada en archivos de un organismo público y su contenido estará compuesto por informes analíticos y críticos e ilustraciones con dibujos y fotografías.

- Carta internacional para la conservación de ciudades históricas y áreas urbanas históricas. Carta de Washington (1987)

Esta Carta concierne a los núcleos urbanos de carácter histórico, todo tipo de poblaciones y más concretamente, los cascos, centros, barrios, barriadas, arrabales u otras zonas que posean dicho carácter, con su entorno natural o hecho por el hombre. El documento surge como complemento a la Carta de Venecia (1964) y como consecuencia de la amenaza existente de degradación, deterioro y por la posible destrucción por la forma de desarrollo urbano de la era industrial.

Para evitar que dichas amenazas pudieran afectar a la autenticidad de la población o área urbana histórica ciertos elementos materiales y espirituales son determinados como valores a conservar. Aspectos como la forma urbana (trama y parcelario), relación de espacios (urbano, edificios, zonas verdes y libres) o la forma y aspectos de los edificios son ejemplos de elementos a conservar tal y como se menciona en la Carta. Otro aspecto relevante es la participación y compromiso que se plantea hacia los habitantes como figura clave de conservación del área urbana, ya que un entorno urbano sin sus habitantes carecería del mismo valor.

- Carta de Cracovia (2000). Principios para la conservación y restauración del patrimonio construido.

Tras aproximadamente 40 años desde la redacción de la Carta de Venecia y con la entrada al nuevo milenio se redactó esta nueva carta con objeto de actualizar los criterios a los cambios producidos en el ámbito jurídico, cultural y tecnológico.

Se hace gran hincapié en la gran diversidad cultural y pluralidad de los valores relacionados con los bienes muebles, inmuebles y el patrimonio intelectual que



convive en la Europa del nuevo milenio. También se hace referencia a que el patrimonio no puede ser definido de manera unívoca y estable debido a la variabilidad en el tiempo de los valores que definen el patrimonio, es decir se produce un proceso de evolución continua.

Además se indica que todo proceso de conservación patrimonial se debe de llevar a cabo bajo un proyecto de restauración basado en la recogida de información, conocimiento profundo del edificio y/o el emplazamiento. En este proceso deben de participar todas las disciplinas pertinentes bajo la coordinación de una persona cualificada en materia de conservación y restauración.

Otro de los aspectos destacables consiste a la importancia que se le otorga a las técnicas de conservación o protección que deben de estar vinculadas a la investigación pluridisciplinar científica sobre materiales y tecnologías usadas para el patrimonio edificado. Además se añade que se debe de realizar un control continuo de dichas tecnologías teniendo en consideración los resultados obtenidos, su comportamiento posterior y la posibilidad eventual de reversibilidad.

4. Binomio Patrimonio Edificado y Eficiencia Energética

Los apartados anteriores han tratado de mostrar dos de las áreas de trabajo del sector de la edificación, la rehabilitación energética y el patrimonio edificado. Ambos representan dos subsectores de gran relevancia debido a la implicación que tienen tanto en el ámbito social, económico, político y cultural. Además, teniendo en cuenta los requisitos actuales de confort y consumo de energía en los edificios, las inversiones en eficiencia energética del patrimonio construido se han convertido en una gran oportunidad para la sostenibilidad del desarrollo urbano [22].

Una vez planteado el panorama existente, no parece descabellado que gran parte de las futuras intervenciones de optimización energética se centren en la tipología edificatoria histórica. Si bien el volumen de actuación no alcanza las cifras de los edificios modernos, el potencial existente en edificación patrimonial es también elevado. Además, debido a sus particularidades las intervenciones deberán de ser minuciosamente evaluadas, pues cualquier intervención irreversible pondría en peligro los valores del edificio.

A pesar de la notoria necesidad existente de actuación sobre esta tipología edificatoria el área de trabajo aún está muy poco desarrollada, lo que conlleva a que exista una falta de conocimiento sobre las metodologías específicas aplicables. Además, la directiva europea en materia de eficiencia energética [10] ha sido flexible con la regulación de los edificios históricos dejando el poder de aplicación a los estados miembros [23]. Debido a ello, el número de intervenciones de rehabilitación

energética sobre esta tipología edificatoria es muy pequeña. Además, las pocas intervenciones que se realizan por lo general se basan en métodos aplicables a edificios modernos y que en ningún caso pueden ser susceptibles de réplica en edificios históricos por el riesgo que conlleva.

Dada la situación ante la que se encuentra el sector, las investigaciones sobre la materia han comenzado a crecer Figura 1. 16, lo que muestra la relevancia de la temática para los próximos años. También, pero de una manera muy discreta, la Directiva (UE) 2018/844 [20] citada anteriormente, hace una pequeña referencia a estos edificios:

“(18) Es preciso fomentar la investigación y el ensayo de nuevas soluciones capaces de mejorar el nivel de eficiencia energética de los edificios y sitios de interés histórico, garantizando al mismo tiempo la protección y la conservación del patrimonio cultural.”

Estos indicios conllevan a pensar a que a medida que las directivas y sus correspondientes transposiciones a los estados miembros vayan regulando la intervención sobre la tipología histórica esta irá adquiriendo cada vez mayor relevancia.

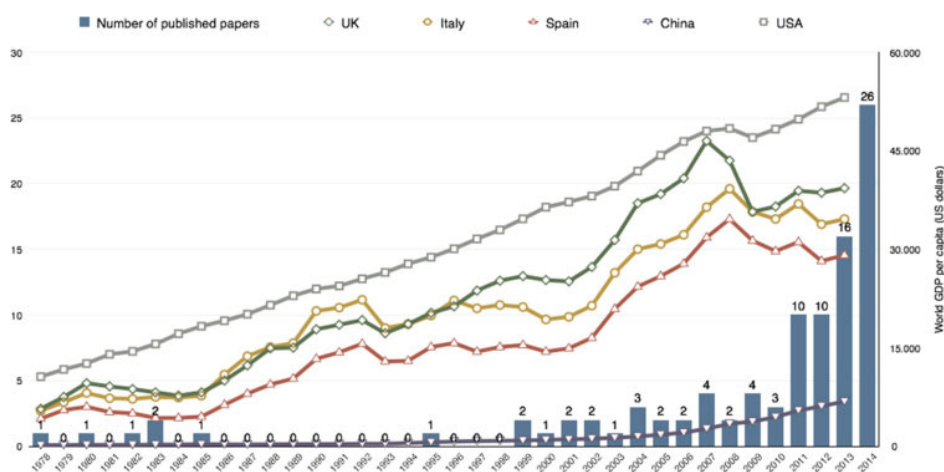


Figura 1. 16.- Número de publicaciones frente al PIB per cápita sobre eficiencia energética y confort térmico en edificios históricos [24].

Los primeros resultados sobre la materia son las diversas guías [25-30] y congresos [31,32] que se han ido desarrollando con objeto de servir como patrón y establecer unas pautas para las intervenciones de mejora de la eficiencia energética en este tipo de edificios. También asociaciones como ASHRAE, CEN, CIBSE y REHVA han prestado gran atención en la materia a través de las directrices que han desarrollado con las recientes guías publicadas [33-36].

Además, en el ámbito internacional también está aumentando el desarrollo de programas de investigación específicos en el ámbito de patrimonio edificado y eficiencia energética, Figura 1. 17 Claro ejemplo pueden ser los diversos proyectos de

Europeos, de los cuales además como resultado han surgido varias guías de rehabilitación que se han sumado a aquellas citadas anteriormente. Si bien el objetivo general de todos los proyectos es común, la reducción del consumo energético producido por los edificios, pueden encontrarse diferencias en la forma en la que se orienta cada investigación. Desde la detección de las barreras existentes para facilitar la futura aplicación de medidas de mejora (SECHURBA), pasando por la aplicación de dichas medidas tanto a nivel de edificio (VIOLET) o distrito (EFFESUS), metodologías integrales (3ENCULT, RENERPARTH), o aspectos muy concretos como soluciones constructivas específicas (RIBuild) o incluso el desarrollo de futuras normativas europeas para la regulación de las intervenciones de rehabilitación energética sobre esta tipología (RENERPATH2).

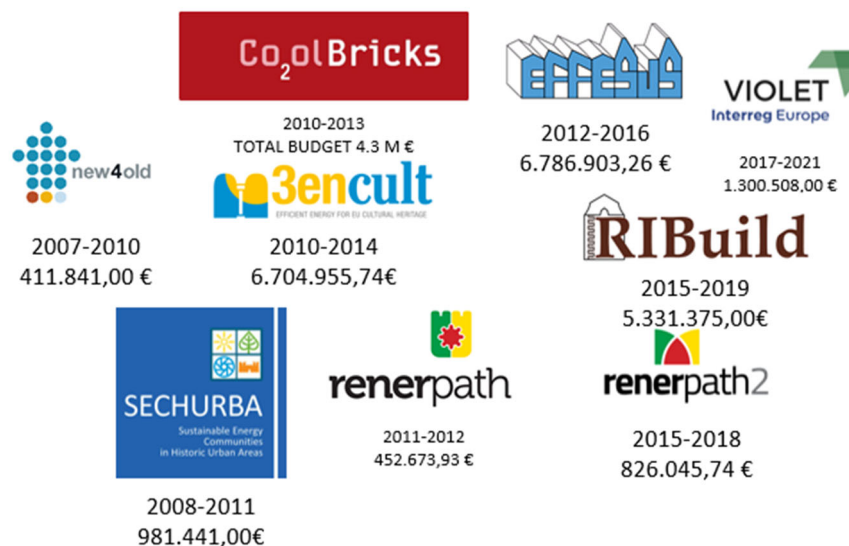


Figura 1. 17.-Proyectos europeos de investigación en materia de patrimonio edificado y eficiencia energética.

Sin embargo, este tipo de edificios presentan ciertas dificultades ya que se construyen con técnicas tradicionales de construcción. Las características constructivas por las que se distingue la edificación histórica son:

- Envolventes complejas y heterogéneas compuestas por muros de grandes espesores que aportan gran inercia térmica, Figura 1. 18.
- Empleo de materiales locales para la construcción de los edificios.
- Elementos bioclimáticos tales como galerías, miradores y patios interiores.
- Gestión del transporte del aire y la humedad en los edificios mediante el empleo de materiales permeables, la ventilación natural, la tasa elevada de infiltraciones/exfiltraciones y las chimeneas, Figura 1. 19.



Figura 1. 18.-Envolvente de los bloques de edificios de la calle Easo de Donostia-San Sebastián durante la fase de deconstrucción.

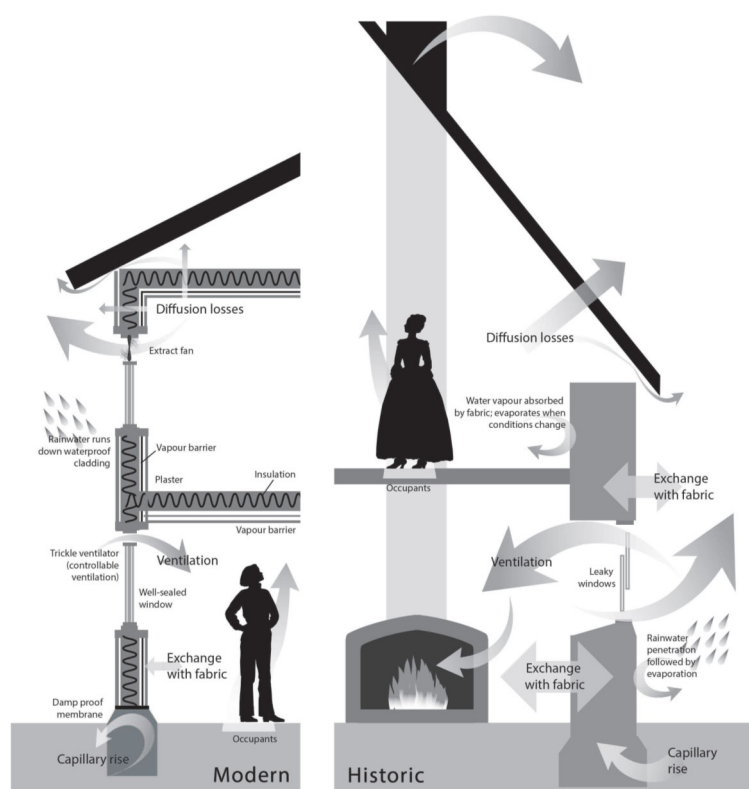


Figura 1. 19.- Movimientos de humedad y aire en edificación histórica y moderna [37].

A esto, se deben agregar las restricciones existentes debido a las normas de protección del patrimonio construido que limitan el tipo de intervenciones a realizar. Todo esto significa que la evaluación energética y las intervenciones en estos edificios tienen un elevado grado de complejidad. Por lo tanto, tal y como indican varios estudios [27,38] es necesario aumentar la investigación en esta área. Gracias a estas investigaciones, se evitarán futuras intervenciones inapropiadas; especialmente aquellas que podrían empeorar el confort interior o aquellas que podrían producir una pérdida irreversible de nuestro patrimonio.

Varios son los tipos de actuaciones que pueden ser llevados a cabo para mejorar el comportamiento energético en estos edificios tal como la implementación de aislamiento térmico a la envolvente, mejorar la estanqueidad al aire [39], la instalación de sistemas más eficientes de climatización (calefacción, ventilación y/o refrigeración) o la implementación de sistemas de monitorización [40,41]. A pesar de la gran diversidad del tipo de intervenciones a realizar en este tipo de edificios, todos ellos siguen un criterio común. Mantener un equilibrio entre las mejoras energéticas y la conservación del valor patrimonial, y tal como mostraron Arumägi et al. [42], este objetivo es posible.

Para ello, uno de los aspectos fundamentales de las actuaciones es que deben de ser equilibradas a través de un enfoque del conjunto del edificio integrando diferentes medidas sobre la envolvente (aislamiento, carpinterías, estanqueidad, protección frente a la lluvia), sus instalaciones (calefacción, ventilación, refrigeración, energías renovables y control) y sobre la concienciación de los usuarios para un uso correcto del edificio, Figura 1. 20. Estos tres tipos de medidas están estrechamente relacionadas unas con otras por lo que es importante conocer la posible interacción que puede llegar a tener un tipo de intervención con el resto del edificio y evitar así posibles riesgos no deseados. Sólo cuando todas estas medidas se adapten al contexto al que pertenece el edificio podrá decirse que la actuación ha sido equilibrada logrando el balance global [37].

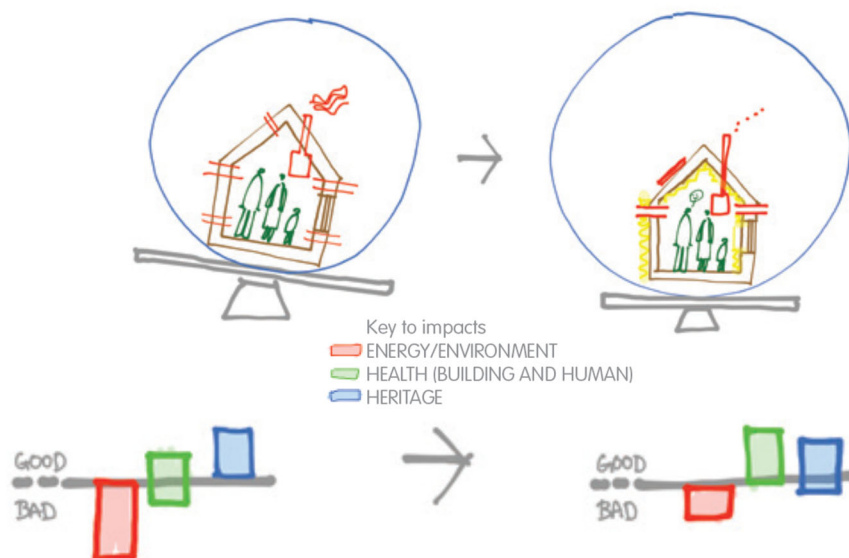


Figura 1. 20.-Balance de un edificio histórico mediante un enfoque holístico de rehabilitación [43].

Rehabilitaciones inapropiadas pueden conducir a la aparición de consecuencias no deseadas tales como las condensaciones, el crecimiento de moho, Figura 1. 21, o la

podrición de algún elemento constructivo a través de los hongos de podrición seca o húmeda, Figura 1. 22. Las mismas son dadas por un determinado grado de humedad en el elemento constructivo como consecuencia de unas condiciones ambientales inadmisibles de los edificios, una elevada producción interior de humedad, lluvia o algún foco no controlado de humedad. Estas condiciones de elevada humedad pueden generar a su vez aparición de esporas que afectan directamente sobre la salud de los usuarios y que puede agravarse aún más si las intervenciones de rehabilitación dan como resultado una reducción de la tasa natural de ventilación como consecuencia del aumento del grado de estanqueidad de los edificios sin la aplicación de medidas para garantizar la calidad del aire interior.



Figura 1. 21.-Caso extremo de crecimiento de moho en la parte interior de un muro [43].



Figura 1. 22.- Fenómeno patológico de podrición de las cabezas de solivos de madera.

Por otro lado, existe el riesgo de pérdida del patrimonio edificado como resultado de las medidas de intervención que no han considerado mantener sus valores histórico-artísticos. Por lo tanto, en la medida que este tipo de edificios pueden verse alterados mediante soluciones exteriores, como la adición de aislamiento exterior sobre los muros, la sustitución de carpinterías o intervención sobre cubiertas, y soluciones interiores, como la implantación de nuevas instalaciones, actuación sobre techos o paredes interiores, existe un elevado riesgo de pérdida del valor patrimonial, Figura 1. 23.



Figura 1. 23.-Intervención de rehabilitación energética con efecto sobre el valor patrimonial del edificio y del propio entorno al que pertenece [43].

Es por ello que todo tipo de intervención se debe de seguir bajo una metodología de actuación capaz de lograr los objetivos de rehabilitación, manteniendo intactos los valores histórico-artísticos del edificio, garantizando a su vez la integridad del edificio y la salud de sus usuarios.

5. Tesiaren ikuspegia, helburuak eta egitura

Doktorego Tesi honen helburua estrategia pasiboetan oinarritutako esku-hartzeen bidez eraikitako ondarearen eraginkortasun energetikoa hobetzea da, aldi berean, eraikinen izaera historiko-artistikoa guztiz mantenduz. Horretarako, lehenik eta behin zenbait galdera erantzutea beharrezkoa izan da ikerketaren ibilbidea zehazteko:

Zein da eraikitako ondarearen energia kontsumoaren egoera erreal eta zein dira parametro garrantzitsuenak kontsumorako?

Datu errealak lortzeko beharrezkoa izan da zenbait saiakuntza esperimentalak egitea lagin adierazgarri bat lortu ahal izateko. Horri esker posible izan da, alde batetik, alderdi ezberdinek eraikinen energian duten eragina ezagutzera, eta bestetik, zenbait harreman aurkitu dira etorkizuneko lanetan eta ikerketetan erabili ahal izango direnak.

Ba al dago eraikitako ondarearen baldintzak hobetzeko aukerarik esku-hartze energetiko eraginkorrekin eta beren balio historiko-artistikoa aldatu gabe?

Estrategia pasiboen bidezko galera termikoen murrizketari dagokionez, inguratzaille termikoa, zati opakotzat ulertzen dena, esku-hartzearen helburu bihurtzen da. Fatxada nagusien energia eraginkortasuna hobetzeko ekintzak, ekintza itzulezinak saihesteko asmoz arautuak, barrualdeko interbentzioen bidez planteatu daitezke. Hala eta guztiz ere, ikuspegi honek honako galdera dakar:

Proposatutako esku-hartzea segurua da hezetasunaren kondentsazio interstizialarekin lotutako prozesu patologikoen eta egurra usteltzearen arriskuen aurka?

Inguratzaille termikoaren barruko hobekuntzek fatxadaren profil higrotermikoan aldaketak sortzen dituzte, izan ere, bere temperatura jaisten da eta hezetasuna handitzen da. Aldaketa hau baldintza higrotermiko zehatz batzuetara iristen bada denbora luze batean zehar, posible da prozesu patologikoak hastea. Inguratzaille termikoak ebaluatzeko metodo tradizionalak ez dira nahikoak, izan ere, ez dituzte kontuan hartzen alderdi garrantzitsuak, besteak beste, euria, eguzki erradiazioa, ur likidoaren garraioa edo aldaketa dinamikoak denboran zehar. Hori dela eta, materialen eta eraikuntza osagaien bero eta hezetasun transmisioaren eredu aurreratuek ikerketa mota honetako beharretarako esku-hartzeak diseinatzea ahalbidetuko dute.

Zein da lortu daitekeen energia hobekuntza globala esku-hartze pasiboen bidez ikerketako eraikuntza tipologiarentzat?

Galdera honi erantzuna eman ahal izateko, beharrezkoa bihurtzen du oinarri puntu bat ezartzea proposatutako esku-hartze energetikoa konparatu ahal izateko. Aldi berean, ez dago proposamen bakar bat, beraz, hainbat emaitza egon daitezke hobekuntza energetikoaren bidez. Ondorioz, eraikinen simulazio dinamikoak tresna ezinbestekoa da jatorrizko kasuarekiko lortutako energia hobekuntza maila zehazteko. Hala ere, benetako beharrentzat aplikagarriak diren birgaitze energetikorako diseinuak planteatu nahi badira, galdera honek beste azterketa gehigarri bat planteatzen du:



Zein da esku-hartze konbinazio onena kostuaren eta energi aurrezkiaren arteko erlazioari dagokionez?

Aurreko erantzunarekin jarraituz, azterketa metodoak proposatutako neurrien kostuak kontuan hartu behar ditu. Modu honetan, optimizazio eredu bidez eta kostu gutxien duen eta aurrezki energetiko handiena lortzen duen esku-hartzea helburua izanik, beharren arabera birgaitze energetikoak proposatuko dira.

Jarraian Doktorego Tesiaren egitura aurkezten da:

I. Kapituluan ikerketaren sarrerarekin hasi da. Bertan energiaren inguruko aurrekari orokorrak aurkeztu dira, honela, kapitulu honetan haria tesiaren gai nagusira bideratuz, hain zuzen ere, eraikitako ondarearen birgaitze energetikoa. Lehenik eta behin eraikinen birgaitze energetikoan dagoen erronka nagusia aurkeztu da. Sektor hau kontsumo energetikoan eragin handienetakoa duenez, energia eraginkortasun irizpideen aplikazioak trantsizio energetikoarekin aurrera egitea ahalbidetuko du. Ondoren, arkitektura eta eraikitako ondarearekin lotutako esku-hartzeen ikuspegi orokor bat emateko asmoz, teoria eta dokumentu nagusien eboluzioa garatu da. Azkenik, azterketa gaiaren artearen egoera burutu da. Lehenengo, dauden metodologia eta arauak aurkeztu dira, honela, ikuspegi orokor bat eman eta gaur egungo lanen joera azalduz. Azkenean, gaia honi buruz egiten ari diren ikerketen berrikusketa aurrera eramane da alderdi berrienak ezagutzeko. Laburpen honi esker posible izan da gaian aurkitzen diren hutsuneak detektatzea, hauek Tesi honetan garatu direlarik.

II. Kapituluan Tesiaren alderdi esperimentala azaldu da sektorearen egoera erreala ezagutzeko helburuarekin. Horretarako, Donostian XIX mendeko hirugarren herenean eta XX mendeko lehen herenaren leku hartu zuen hiri garapenaren ikerketa egin da. Izan ere, arkitektura ondarearen ordezkari fidagarria da. Azterketa 8 eraikinetan egin diren 37 estankotasun saiakuntzekin hasi da, honela, erabilera eta egoera desberdineko eraikin tipologiak aurkeztuz. Bestalde, atal esperimentalean mota honetako eraikinetako ingurutzaille termikoetan erabiltzen diren materialen propietate termikoak zehaztu dira, hain zuzen ere, hareharria eta kareharria. Modu honetan, ingurutzaille termikoen bero transmisioan eragin handia duen oinarriko propietate bat zehazten da. Honi esker posible izan da lodieraren eta harrizko materialaren arabera hormen transmisio termikoaren koefizientea zehazten duen eredu garatzea.

III. Kapituluaren helburua ingurutzaille termikoaren bidez gertatzen diren bero galerak murriztea da Barruko Isolamendu Termikoko Sistemen (BITS) bidez. Soluzio hauek ez dute fatxaden balio arkitektonikoa aldatzen, izan ere, esku-hartze hauek

barrualdetik egiten dira. Hala ere, badaude arriskuak hezetasunarekin edo egurraren usteltzearekin lotuta daudenak. Hori dela eta, kapitulu honetan eraikinetako materialen eta osagaien hezetasun garraioen kontzeptuetan oinarrituta dauden simulazio dinamikoak burutu dira, Eranskinean agertzen direnak. Hauen helburua barne isolamendu termikoko esku-hartzeetan segurtasuna bermatzea da.

Egungo egoera energetikoa ikertu eta esku-hartze aukerak proposatu ondoren, **IV. Kapitulu**an bere efektu konbinatua ebaluatzen da eraikinen portaera energetiko orokorra ikertzeko asmoz. Horretarako, atal hau erreferentziako eraikin bati egindako simulazio dinamikoaren emaitzetan oinarritzen da. Modu honetan, posible izan da hasierako egoera birgaitze energetikoko egoera desberdinekin konparatzea. Planteamendu hau garatzeko simulazioak eredu parametrikoki optimizatuekin burutu dira, honela, lehentasun orden bat emanez kostu-aurrezki energetikoaren arabera.

V. Kapitulua II. Kapituluarekin paraleloan garatzen da eraikuntza sektorearen digitalizazioarekin lotuta ikerketa lerroaren bidez. Eraikuntzako sektorean gertatzen diren prozesu desberdinen monitorizazioa eta kontrola garrantzi handikoa da, hori dela eta, instrumentazioa oinarritzeko euskarri tresna bihurtzen da. Hala ere, ekipamendu komertzialekiko mendekotasunaren ondorioz, kostu onargarri batean proiektu bakoitzaren behar espezifikoetara moldatzen den ekipamendua garatzeko zailtasunak daude. Ondorioz, kapitulu honetan monitorizazio ekipamendu baten garapena aurkezten da arazo hauek konpontzeko. Hau kode eta hardware irekiko plataformetan oinarrituta dago (OSP) eta Gauzen Internetean (GI).

IV. Kapituluan ondorio nagusiak eta Tesi hau burutzean detektatu diren etorkizuneko ikerketa lerroak aurkezten dira.

Ondoren, **Bibliografiako** atalean kapitulu bakoitzean zehar aipatu diren erreferentzia guztiak daude.

Azkenik, **Eranskinean** Tesiaren irakurketan laguntzen duten zenbait dokumentu agertzen dira. Bertan III. Kapitulu aipatutako eraikuntzako materialen hezetasun garraioaren oinarriak azaltzen dira. Honetaz gain, II. eta V. Kapituluako monitorizazio ekipoen kodearen garapena eta IV. Kapituluako simulazio energetikoetan erabilitako elementuen xehetasunak eta prezioak ere aurkezten dira.

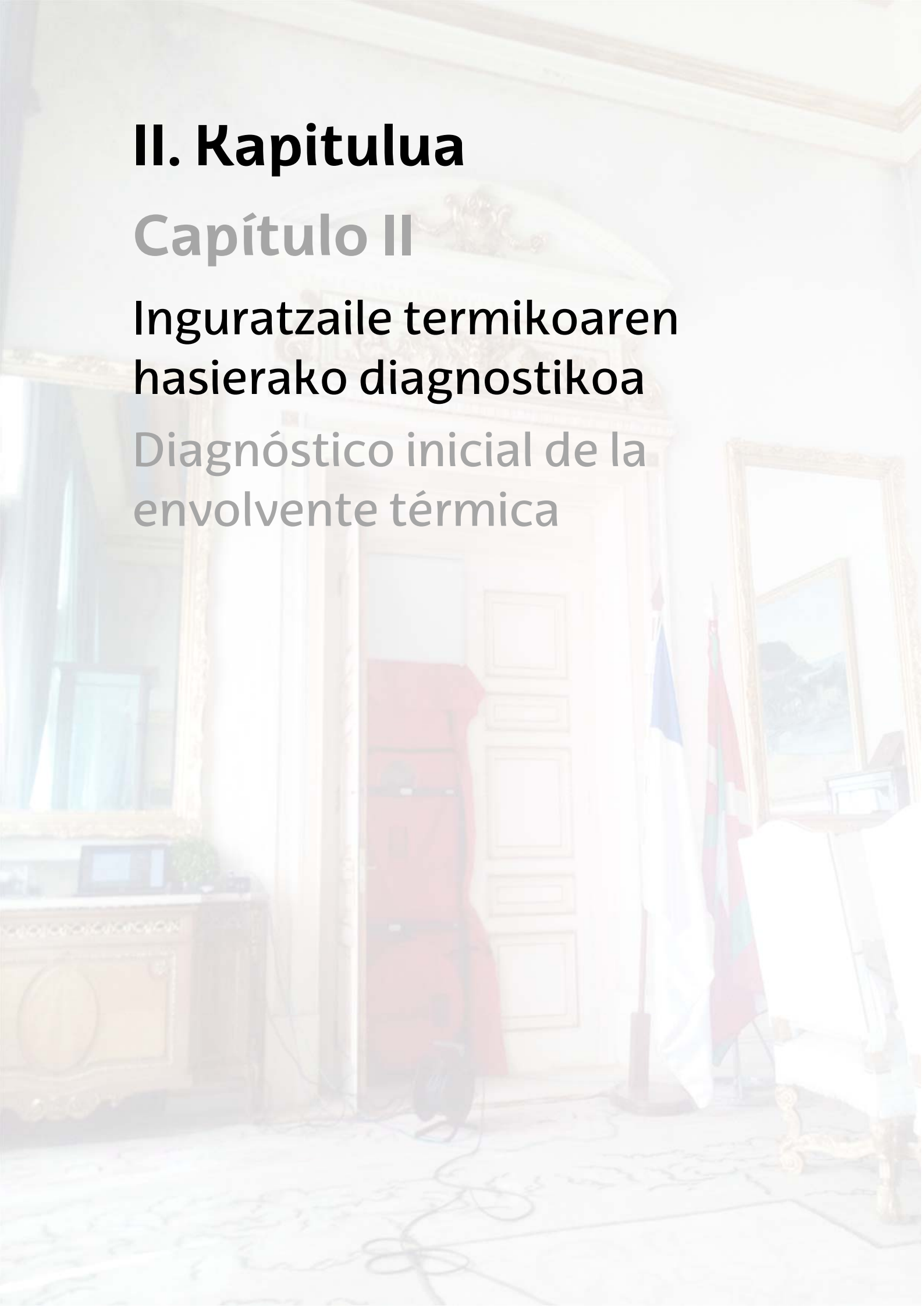


II. Kapituluua

Capítulo II

Inguratzaile termikoaren
hasierako diagnostikoa

Diagnóstico inicial de la
envolvente térmica



Laburpena:

Kapitulu honetan doktorego-tesian burututako fase esperimentalak aurkezten da. Eraikuntza tipologia honen berokuntza-eskarian eragina handia duten bi faktore garrantzitsuenak aztertzen dira. Lehenik eta behin, Donostiaren zabalguneko hainbat eraikinetan ate-haizagailuaren bitartez burutako saiakuntza kanpaina lortutako emaitzak erakusten dira ingurutzailerak termikoa zeharkatzen duten aire galerak kuantifikatzeko. Bigarrenik, jatorrizko horretan erabiltzen diren harrizko material nagusien karakterizazio termikoa burutu da eroankortasun termikoaren saiakuntzen bitartez. Gainera, erregresio-doikuntza metodoaren bidez bero-garraioaren simulazio parametrikotik lortutako emaitzak egokitzeko gai izan den eredu bat garatu da. Horrela, aurkitu daitekeen horma mota bakoitzaren portaera termikoa ezaugarri espezifikoaren arabera definitzea posible da.

Resumen:

Este capítulo presenta la fase experimental llevada a cabo durante la tesis doctoral. Se analizan dos de los factores más importantes que afectan a la demanda energética de calefacción de esta tipología edificatoria. En primer lugar se presentan los resultados obtenidos en una campaña de ensayos llevada a cabo en diversos edificios del ensanche de Donostia-San Sebastián mediante el ensayo puerta ventilador con el objeto de la cuantificación de las pérdidas de aire que atraviesan la envolvente térmica. En un segundo lugar, se ha llevado a cabo la caracterización térmica de los principales materiales pétreos que son empleados en los muros originales a través de los ensayos de conductividad térmica. Además, se ha desarrollado un modelo capaz de ajustar los resultados obtenidos en las simulaciones paramétricas de transporte de calor mediante el método de ajuste por regresión. De esta manera se ha logrado definir el comportamiento térmico de la tipología de muros evaluada en función de las características específicas de cada caso.

2.1. Sarrera

Bi dira eraikinen bero galeretan eragina duten parametroak. Alde batetik inguratzaitetik gauzatzen den bero transmisioa eta beste aldetik kanpoaldetik sartutako airearen sortutako karga termikoa. Aztertuko den eraikinaren lokalizazioaren eta barneko kargen arabera eraikinak sortutako karga termikoari aurre egin beharko dio barne konforta eskaintzeko.

Ingurutzaitetik termikoa da eraikin barneko baldintzak eta kanpoaldeko baldintzak baztertzen duen elementua. Beraz bere diseinua, eraikuntza eta kontrol egokia garrantzi handikoak dira bero transmisio eta sartutako airea sortutako galera termikoak murrizteko.

Oro har, eraikitako eraikuntzetan, zehazki eraikitako ondarean, ingurutzaitetik ezaugarri termikoei buruzko informazio gabezia ohikoa da. Horren ondorioz, eraikin mota hauetan azterketa termiko zehatzak garatzeko muga bat dago. Eraikinen energia eraginkortasun araudia kontuan hartuta [1] eraikin mota hauek ez dute neurri mota hauek aplikatzeko beharrik. Hala ere, azken aldaketan ondorioz [2], eraikitako ondarearen energia-eraginkortasunari buruzko ikerketek nolabaiteko garrantzia lortu dute. Beraz, denbora pasa ahala eraikin mota hauei buruzko informazioa eta azterketa kasuak handitu egingo dira.



Eraikitako ondarearen ingurutzailer termikoak, karga-hormak hain zuzen ere, material desberdinez proportzio ezberdinetan osatuta daude. Hori dela eta, elementu hauetan sortzen diren galerak bero transmisioaren ondorioz kalkulatzeko zaildu egiten du. Alde batetik hormak osatzen duten materialen oinarritzko ezaugarri termikoak ez direlako ezagutzen. Beste aldetik horma hauetan sortzen diren bero galeren handitzea, bi eta hiru dimentsioko zubi-termikoen ondorioz, kalkulatzeko metodologia bereziak behar direlako. Hortaz, ingurutzailer termiko mota hauen karakterizazio termikoak garatu ahal izateko beharra handia dago.

Ingurutzailer termikotik sortutako nahi gabeko aire sarrerak edo ihesak, infiltrazioak eta exfiltrazioak deritze. Hauek eraikuntan sortzen diren %20 eta %50 arteko bero galeren arduradunak dira [3]. Eraikin bakoitzean sortutako aire transmisioa ingurutzaileraren ihes-arearen eta klima baldintzen (stack efektua eta haizea) arabera da. Zenbat eta handiagoa izan ihes-area orduan eta bero galerak handiagoak izango dira. Beraz, aire ihesak saihestu nahi izatekotan, ihes-area murriztea helburu bihurtzen da. Diseinu fasean, ezin da zehazki jakin zenbat izango den ihes-arearen kopurua, hala ere badaude parametro hau estimatu ahal izateko metodoak, 2.1.Taula. Beste aldetik, eraikuntza fasean prozedura zehatzak erabil daitezke gertatzen diren aire ihes errealak kalkulatzeko. Metodo hedatuena, haizagailu-atea bezala ezagututa [4,5], eraikinaren ingurutzailer zeharkatzen den airearen fluxua neurtzea ahalbidetzen du.

2. 1. Taula- Eraikinaren diseinu fasean kontuan hartzeko aire ihes-area hermetikotasun mailaren arabera.

Eraikinaren hermetikotasun maila	Deskribapena	Ihes-area (cm ² /m ²)
Hermetikoa	Hermetikotasun aditu batengatik gainbegiratutako eraikuntza	0.7
Ona	Eraikitzaile aditu batez kontu handiz zigitatutako eraikuntza bat.	1.4
Ertaina	Egungo ekoizpen etxe tipikoak.	2.8
Iragazkorra	1970eko aurreko etxe tipikoak	5.6
Oso iragazkorra	Etxe zaharrak jatorrizko egoeran	10.4

Eraikin mota hauen hormen konposizioa oso aldakorra izan daiteke. Hori dela eta, transmisioz sortutako bero galerak ere oso desberdinak izan daitezke. Gainera, ikusi den bezala ingurutzailer termikoa aire estankotasunean, beraz sortutako galera termikoetan, duen garrantzia handia da. Eraikitako ondarearen ingurutzaileraren ezaugarri termikoei buruzko informazio gabezia falta dela eta, arlo honetan ikerketa gehiago burutzea ezinbestekoan bihurtu da.

2.2. Helmena eta helburuak

Kapitulu honen helburu nagusia eraikitako ondarearen benetako egoera termikoa zehaztea da. Horretarako inguratzaile termikoen azterketa esperimentalen bidez eraikinen portaera termikoan eragin nabarmena duten parametroen azterketa burutuko da. Helburua kontuan izanda eta azterketa esperimentalak gauzatu ahal izateko analisia azterketa eremu batean mugatzea beharrezkoa da.

Hortaz, kapitulu honek hurrengo helburuak ezartzen ditu:

- 2.1. **Helburua** Azterketa eremua hautatzea eraikitako ondare tipologiaren ezaugarri nabarmenak kontuan izanda.
- 2.2. **Helburua** Eraikitako ondarearen aire estankotasunarekiko portaeraren zehaztapena.
- 2.3. **Helburua** Eraikin tipologia honetako hormak osatzen duten material nagusien ezaugarri termikoen zehaztapena.
- 2.4. **Helburua** Aztertutako inguratzaile termikoen portaera termikoa zehazteko modelo bat garatu izan ditzaketen geometria eta ezaugarri termikoen aldakuntzak kontuan izanda.

2.3. Metodologia

2.3.1. Kapituluaren egitura

Kapitulu honen sarrera eta helburuak aurkeztu ondoren, ikerketa osoan zehar burututako metodologia azalduko da, 2.1.irudia. Lehenik eta behin, azterketa eremuaren ezaugarri arkitektoniko nagusienak aurkeztuko dira eraikitako ondarearen tipologia deskribatzeko. Ondoren, eraikin mota honen portaera termikoan efektu gehien duten parametroak ikuspegi zabal batetik aztertuko dira. Alderdi nagusienak detektatu ahal izan eta gero bere azterketa sakonarekin jarraituko da.

Horretarako lehenik eta behin saiakuntza esperimentalen bitartez parametro hauen karakterizazioa burutuko da. Ezaugarrien determinazioan oinarrituta eta simulazioan egindako azterketaren bitartez, inguratzaile termikoen bero transmisioarekiko portaera analisia garatuko da. Ebaluazio honek eredu bat garatzeko aukera eskaini behar du eraikin mota hauen inguratzaile termikoen portaera karakterizatzeko eta kasu honetan aurki daitezkeen aldakuntza geometrikoak eta termikoak kontuan izanda.

Azterketa esperimentalei dagokionez alde batetik azterketa eremuaren eraikin kasuetan bertan egin dira. Gainerako analisiak, saiakuntzaren metodologiagatik, Gasteizko Eraikuntza Kalitatearen Kontrolerako Laborategiko (EKKL) Termika Atalean eta Gipuzkoako Ingeniaritza Eskolako (Donostia) laborategietan burutu dira.

Azkenik, kapitulu osoaren ondorioekin jarraituko da. Kapitulu honen egitura berezia dela eta ondorio nagusienak aurkeztuko dira atal honetan ondorio zehatzak azterketen atalean soilik aurkeztu ahal izateko.



2. 1. Irudia- Kapitulu egituraren deskribapen grafikoa

2.3.2. Azterketa-eremuaren definizioa

Ikerketa burutu ahal izateko eta zati esperimentala duenez kontuan izanda beharrezkoa da azterketa eremu bat ezartzea. Honek eraikitako ondarearen ezaugarri nagusiak eduki behar ditu lortutako ondorioak estrapolatu ahal izateko. Horren ondorioz eraikitako ondarearen eraikin moten ezaugarri nagusiak identifikatzea beharrezkoa bihurtzen da aztertutako eremuak bete ditzan:

- Eraikitako tipologia ahalik eta adierazgarria izatea.
- Horma nagusiak harriez osatuta izatea.
- Horma nagusiak karga-hormak izatea.
- Egurrezko habeez osatutako barne egitura.
- Eraikitako ondare araugatik babesturiko eraikin mota izatea.

Bete beharreko baldintzak kontuan izanda Donostiako XIX. mendeko zabalgunea adibide bezala kontuan hartu daiteke.

Azterketa eremuaren jatorriak 1864an Donostia hiriko harresien eraistearekin, aurreko urtean Gerra Plaza kondizio galeraren ondorioz, bat datoz. Harresien eraispeneren ostean, hiriaren hedapena harresien kanpoaldetik gero eta egingarri ikusten zen.

Hori dela eta, 1862an hirigintzako lehiaketa bat antolatu zen. Lehiaketa honen irabazlea Antonio Cortázar, "Porvenir" deituriko proiektuarekin izan zen. Jatorrizko proiektuaren aldaketa batzuen, lursailen salmenten eta 1865eko eraikuntza ordenamendu berrien onarpenaren ondoren, hiri proiektuaren lehenengo lursailak eraikitzen hasi zen.

Zabalgunearen garapena hiru fasetan egin zen, 2.2.Irudia. Lehenengo hamar urteetan lehenengo fasea garatu zen Bulebarretik Askatasunaren Hiribidera. Bigarren fasearen garapena, 1875-1890, gerra karlistaren ondorioz, modu motelagoan garatu zen. Fase honetan lehenengo faseko lursailetan eraiki arren, batez ere askatasunaren hiribidetik San Martineko Kalera arte izan ziren eraikitzeko erabili lursail nagusiak. Azkeneko fasea, garrantzitsuena izanik eraikin kopuruagatik, 1890 eta 1915 artean izan zen eta San Martin Kalea eta Easo aldera arte okupatu zuen garapena.



2. 2. Irudia- Aztertutako eremuaren eraikinen sailkapena urteko eraikuntzaren arabera [6].

Hirigintza proiektu honen protagonistak etxe-uharte itxiak izkina alakatuekin dira. Etxe-uharte tipoa bere dimentsioen arabera sailkatzen da. Alde batetik, handienak, lehenengo eta azkeneko garapen faseetan eman ziren eta bere neurriak 86x56 edo 82x67 metrokoak ziren. Beste aldetik, txikienak 56x62 metrokoak ziren. Altuerari dagokionez, kalearen orden-mailaren arabera dira. Lehenengo mailako kaleak, 15 metro zabalera baino gehiago dutenak, 20 metro altuera maximoa dute. Bigarren mailako kaleak, 9 eta 15 metro arteko zabalera, 18 metro altuera maximoa eraikinetan dute. Eraikinen tipologiari dagokionez hiru taldetan sailkatu daitezke: mehelin arteko eraikinak, izkinako eraikinak eta banakako eraikinak.

Lehenengo taldea zabalduna da eta orubearen dimentsio ohikoenak 9 eta 10.5 metro arteko zabalera, non normalean 3 leihorako hutsune banatzen dira, eta 20



metro sakonera. Batzuetan 14 metro zabalerako kasuak ikus daitezke eta normalean 4 leiho hutsune izaten dute. Fatxadaren tipologia askotarikoa da, 2. 3. Irudia, normalean hareharrizko harlandukoak izaten dira, beste batzuetan soilagoak dira margotutako emokadura batekin ematen zaielako akabera. Kasu berezietan akabera zeramikoak ere ikus daitezke.



2. 3. Irudia- Aztertutako eremuaren mehelin arteko eraikin adibideak.

Bigarren taldea, hau da izkinako eraikinak 2.4. Irudia, dimentsio handiagokoak dira, izan ere, jatorrian erosahalten handiko gizarterako zuzendu ziren. Horren ondorioz, barruko planta banaketa erabat ezberdina da, horma nagusiko gelak jabeentzako eta barruko gelak eta uharte-patioko gelak zerbitzurako. Dimentsioak aldatu daitezke baina 17.5x10.5 metro eta 20x20 metro arteko lursailak ziren. Fatxadari dagokionez, mehelin arteko eraikinak bezalako kasuetan aurki daitezken fatxadak dira.



2. 4. Irudia- Aztertutako eremuaren izkina eraikin adibideak.

Azkenik, banakako eraikinak eraikin tipologia aldakorrena irudikatzen du eraikin bereziak izaten direlako. Talde honetan banakako etxebizitzetik zuzkidura-eraikinetara aurki daitezke. Eraikin bereziak izatearen ondorioz, eraikin hauen

konposizioa arkitektonikoa oso garatua izaten dute. Eraikin bakoitza konposizio eredu bat jarraitu arren, orokorrean denak elementu bat dute komunean, hareharriaren nagusitasuna fatxadetan.

2.4. Inguratzaile termikoaren azterketa esperimental

Atal honek kapituluaren azterketa zatia garatzen du. Horretarako, airearekiko estankotasuna eta inguratzaile termikoen bero galeren erantzuna azterketa helburu bezala, saiakuntza esperimentaletan eta simulazioetan oinarritutako analisia burutu da.

Ondorioz, aztertutako parametro termiko bakoitzaren analisia garatzeko atala bi zatitan banatu da. Atal bakoitzak kapitulu bat jarraitzen duen egitura garatzen du bakoitzak metodologia propioa duelako. Azkenik, atal bakoitzean lortutako emaitzen eta ondorioen bitartez, kapitulu osoaren ondorio orokorrak lortu dira.

2.4.1. Airearekiko estankotasunaren karakterizazioa

2.4.1.1. Sarrera

Aireztapena eraikinetan Barneko Airearen Kalitatea (BAK) bermatzen duen mekanismoa da. Aldi berean, eraikinen energia-eraginkortasunean eragin kritikoa duen alderdi bat da. Geletan aire freskoa sartzeko beharra bero edo hozte-karga gehigarriak sortzen ditu eta erabiltzen den aireztapen motaren menpe daude. Gutxi gorabehera, aireztapenak eraikinen energia kontsumoaren %30-60koa irudikatzen du [7]. Hori dela eta, gatazka bat dago aireztapen-tasa murriztearen, berokuntza/hozte eskaria gutxitzeko, eta aireztapen-tasa handitzearen, BAK hobetzeko, artean.

Beste alde batetik, European eraikuntzaren energia-araudiak nabarmenki sendotu dira azken hamarkadan [8,9] eta inguratzaile termikoen isolamendu eskakizunak areagotu egin dira bero galerak murrizteko. Horren ondorioz, proportzionalki airearen truke-tasa eraikinen bero-galera energia-eskarian bere eraginak areagotu du. Tradizionalki gogoratu beharra dago eraikinen aire berriztatzearen ondorioz bero-galaretan nabarmen osoko ondorioa duten bi fenomeno desberdin daudela: aireztapena eta infiltrazioa. Hau da, aireztapena eraikinen BAK garantizatzeko ezaugarri beharrezkoa bada, infiltrazioak nahigabeko eta kontrolik gabeko efektua dira. Hori dela eta, infiltrazioek aire fresko gehigarria eskaintzen duten arren, ez dute bermatzen BAK egokia eta eraikinen berokuntza eta hozte-beharrak nabarmen handitu ditzakete.

Ikerketa berri batek eraikuntzen estankotasunaren garrantzia ohartzen du infiltrazioek eraikinen %20 eta %50 arteko energia-eskariaren eragina dutelako [3]. Lehendikako eraikinen kasuetan, aplikagarri diren birgaitze energetikoen neurri



handien artean, eskuarki airearekiko hermetikotasunaren hobekuntza burutzen da, batez ere beste posible esku-hartze bideragarriak ez direnen kasuetan, eraikin historikoetan bezala. Profesional askok hermetikotasun azterketa gauzatzen ari dute energia analisietan, eraikin mota hauetan eragin handia duela eta [10-12].

Hermetikotasunak eraikinetan eragin handia kontuan hartuta, fenomeno horren karakterizazioa hainbat ikuspuntutatik aztertu da. Ikuspegi kualitatibo batetik, Dickerhoff [13] eta Harje eta Born [14] aire-ihesen iturriak aztertu zituzten. Iturri posible bakoitzaren eragina aztertu zuten eta kasuen hainbat eraikuntza-osagai eta instalazio mota kontuan hartuta. Elementu bakoitzaren tarreak eta batez besteko balioak honako moduan ikusi zituzten:

- Hormak: %18-50; %35.
- Sabaien xehetasunak: %3-30; %18.
- Aire behartutako berokuntza eta/edo hozte sistemak: %3-28; %18.
- Ateak eta leihoak: %6-22; %15.
- Tximinia: %0-30; %12.
- Irekiguneak espazio girotutan: %2-12; %5.
- Difusioa hormetan zehar: <%1

Metodo kuantitatiboek dagokienez, eraikinen estankotasunarekiko egoera, eraikuntza osoak edo barrunbe partzialen hermetikotasun azterketei bidez lortzen da. Gogoratu behar da eraikinaren aire-hermetikotasuna ezin dela eraikuntza sistema, eraikinaren adina edo ikuskapen bisual batekin soilik ondorioztatu. Hori dela eta Blower Door Testa (BDT) metodo oso erabilia bihurtu da aire infiltrazioak karakterizatzeko [4,5]. Ohiko hermetikotasun-adierazleak q_{50} eta n_{50} dira. Eraikinaren ingurutzaileraren aire-ihesa tasa eta airearen berritze-tasa adierazten dute hurrenez hurren, barneko eta kanpoaldeko 50 Pa arteko presio diferentziarekin. Presioaren diferentzia handi hau nahikoa da klima aldakorreko baldintzek emaitzetan eragina izan ez dezaten. Hala ere, balioa hau baldintza naturalek eragiten duten aire fluxu baino handiagoa da, normalean 4 eta 10 Pa bitarteko aldea sortzen delako [15]. Infiltrazioetan, hain zuzen ere, hainbat alderdiek eragiten dituzte, hala nola, eguraldiaren baldintzak, eraikuntza mota edo kokapena.

Konplexutasun hori dela-eta, teknika gehigarriak behar dira BDT bidez lortutako emaitzak ebaluatzeko eta egungo eraikinen infiltrazio-tasa erreala kalkulatzeko. 1970eko hamarkadaren amaieran eta 1980ko hamarkadaren hasieran, hainbat ikerketek BDTren emaitzen eta gas-trazatzaile metodoaren emaitzen arteko loturak aurkitu zituzten [4,16,17]. BDT emaitza hauetan oinarrituta, hainbat eredu enpiriko berriak garatu ziren eraikineko airearen infiltrazio-tasa kalkulatzeko, 2.2.Taula.

LBL-ak [18] eta Shermanek [19] garatutako ereduak hedatuenak dira. Lehenengoak (LBL) aire-ihes azalera baliokidea (ELA) 4 Pa-etan eta indar eragileek konbinatzen ditu, hala nola haizearen eragina eta stack-efektua. Prozesu honetan, stack (f_s) eta haizea (f_w) faktoreak tenperatura desberdintasunaren (ΔT) eta haize-abiaduraren (U) balioekin erabiltzen dira. Beste aldetik, Shermanek LBL eredu sinplifikatu zuen urrezko arau ospetsuaren garapenarekin, Kronval eta Persily-rekin egotzitakoa. Eredu honek eraikinaren altuera (cf_1), haize kontrako babes-maila (cf_2), eraikinaren aire-ihes mota (cf_3) eta batez besteko urteko infiltrazio-ihes ratioa (N_o) kontuan hartzen ditu.

2. 2. Taula- Blower Door Test saiakuntzan oinarritzen diren aire infiltrazio ereduak.

Eredua	Ekuazioa
LBL	$Q = \sqrt{Q_s^2 + Q_w^2} = \sqrt{(A_L \cdot f_s \cdot \sqrt{\Delta T})^2 + (A_L \cdot f_w \cdot U)^2}$
Kronval-Pesily	$ACH_{K-P} = \frac{ACH_{50}}{20}$
Sherman	$ACH = \frac{ACH_{50}}{N}; N = N_o \cdot cf_1 \cdot cf_2 \cdot cf_3$
Kronval	$ACH = C_L \cdot (0,026 \cdot \Delta T + 0,010 \cdot U^2)^n$ 1. Tenperaturaren eragina: $ACH = \left(\frac{0,32}{V}\right) \cdot C_L \cdot \Delta T^n$ 2. Haizearen eragina:
Shaw	$ACH_{shielded} = \left(\frac{0,76}{V}\right) \cdot C_L \cdot U^n$ $ACH_{exposed} = \left(\frac{0,42}{V}\right) \cdot C_L \cdot U^{2n}$ 3. Haize eta tenperatura konbinazioa: $ACH = \left(\frac{4,53}{V}\right) \cdot C_L$

BDTaren emaitzen garrantzia eta baliagarritasunarengatik gero eta ikerketa gehiago argitalatzen dira metodologia hau erabiliz. 2.3.Taulan gaur egun arte argitaratutako proben emaitzak erakusten dira, herrialde eta urtearen arabera. Batez besteko hermetikotasuna eta tarteak laburbiltzen ditu kasu bakoitzean, behaketen balore maximoen eta minimoen arteko aldea ezagutzeko. Emaitzen aldakuntza handia erakusten du ebaluatutako eraikinaren tipologiaren arabera. Hala eta guztiz ere, balore orokorrak oso altuak dira eraikinen energia eraginkortasun helburua lortzeko [20].

2.. 3. Taula- Eraikinen estankotasunari buruzko argitalpen berrien berrikuspena.

Herrialdeak	Argitaratu-tako urtea	Lagin zenbakia	\bar{n}_{50} (h^{-1}); \bar{q}_{50} (m^3h/m^2)	Min/Max \bar{q}_{50} (m^3h/m^2)	Min/Max n_{50} (h^{-1})
Espainia [21]	2014	13	6.26 ; 4.41	1.78/8.44	2.57/13.43
Espainia [22]	2013	120	3.40 ; -	-	-
Portugal [12]	2014	8	46.51 ; 219.93	70.28/702.73	15.28/144.62
Finland/Estonia / Suedia [11]*	2015	53	-;13.0/15.8/17.4	3.9/35.2	-
Italia [23]	2013	5	1.74 ; -	-	1.37/1.97
Italia [24]	2012	20	7.30 ; 8.73	2.1/62.7	3.2/23.3
Grezia [25]	2008	20	6.79 ; -	-	1.87/11.30
Irlanda [26]	2012	28	9.64 ; 9.11	5.12/14.42	5.39/14.90
Estonia [27]	2007	32	4.90 ; 4.2	0.9/17.9	0.7/13.6
Portugal [28]	2015	49	7.83 ; -	-	-
Lituania [29]	2014	27	4.73 ; 5.06	0.4/14.61	0.41/11.3

-Informazioa ez eskuragarria



Nabarmentzekoa da neguko denboraldi larriagoa duten herrialdeek errendimendu hermetiko hobea eskaintzen dutela. Hau iparraldeko herrialdeek duten galera termikoen efektu handiagoari eta energia-kontsumoari buruzko duten kezka sakonagoari izan daiteke. Klima beroagoetan, esaterako, hegoaldeko Europa herrialdetan, arauk infiltrazioak kontrolatu orde besterik lehenetsi dute, hala nola, isolamendu termikoak edo eguzkiaren babesa. Hala eta guztiz ere, Europako politika energetiko aldaketek [8,9] eta erabiltzaileen barneko erosotasun hobea lortzeko eskaerak pixkanaka-pixkanaka infiltrazioen kontrola baldintza garrantzitsu batean bihurtu dute eraikinen kalitatea lortzeko.

Aipatutako 2.3.Taulan eraikin historikoak aztertzen dituzten ikerketak [11,12] kasuak dira. Ikusten den bezala, agerian dago eraikin historiko saiakuntzen informazio gabezia. Beraz, ezinbestekoa bihurtu da aire-ihesen ezagutza handitzea eraikin hauen energia eraginkortasuna hobetu ahal izateko.

2.4.1.2. Helmena eta helburuak

Atal honen helburu nagusia ondarearen eraikuntzako hermetikotasunaren ezagutza maila areagotzea da. Horrela, parametroak eraikin tipologia honen eraginkortasun energetikoan duen garrantzia neurtu ahal izango da. Helburu nagusia lortzeko, BDT metodologian oinarritutako saiakuntza kanpaina bat burutu zen Donostiako Kortazar deituriko zabalgunean. Aplikazio-eremu honen eraikinei esker lortutako emaitzekin eraikitako ondarean hermetikotasun datu-base adierazgarri bat garatu ahal izatea eskainiko du.

Hortaz, atal honek hurrengo helburuak ezartzen ditu:

2.4.1.1. Helburua Erabilera mota eta kontserbazio egoera desberdinak dituzten eraikin historikoen zerrenda bat garatzea azterketa-eremuaren kasu adierazgarri multzo bat ezartzeko.

2.4.1.2. Helburua Hautatutako kasuen aire estankotasunarekiko azterketa garatzea.

2.4.1.3. Helburua Emaitzen analisia ebaluatutako eraikuntza tipologiaren ohiko hermetikotasun joera aurkitzeko.

2.4.1.3. Helburua Lortutako emaitzen bitartez, aztertutako kasuen estankotasun maila eta ezaugarrien arteko korrelazio detekzioa eraikitako ondarearen portaera hermetikoa aurreikusteko oinarritzko ereduak garatzeko.

2.4.1.3. Kasu-azterketen aukeraketa

Laginen hautapena eraikin mota, tamaina eta kontserbazio mailaren arabera egin zen emaitzak ahalik eta adierazgarrien izan zitezten. Helburu nagusia hermetikotasun maila ebaluatzea da, eraikin historikoen eraginkortasunean eragiten duen parametro esanguratsu gisa. Guztira, 8 eraikin historiko hautatu ziren azterketarako, 2.4.Taulan identifikatzen dira eta 2.5.Irudian bere kokapena hirian. Eraikinen erabilera motei dagokionez, 4 bizitegi, 2 hezkuntza, 1 kultural eta 1 bulego eraikin dira, azkena hiriaren udaletxea izanez. Horrela, ikertu eta aztertu diren laginak eraikin mota guztietako adierazgarria da.

2.4. Taula-Aztertuako eraikinen zerrenda.

Eraikinaren izena	Erref.	Eraikuntza urtea	Eraikinaren erabilera	Ondare babes-maila
Easo 22	A	1905	Bizitegi	Babesik gabe
Urbietta 38A	B	1893	Hezkuntza	C
Aldamar 3A	C	1901	Hezkuntza	C
Birmingham 11	D	1919	Bizitegi	D
Victoria-Eugenia	E	1910	Antzokia/Administratiboa	A
Ijentea 01	F	1882	City Council	A
Larramendi 13	G	1906	Bizitegi	D
Loiola 14	H	1893	Bizitegi	C



2. 5. Irudia-Kasu-azterketen erabilera mota eta kokapena Donostian.

Ebaluatutako eraikinak etengabe okupatuta zeuden erabiltzaileengatik, beraz, ez zen posible izan eraikin osoko probak egitea. Gainera, ebaluatuen eraikinen dimentsio handiak direla eta, tamaina handiko haizagailutan oinarritutako teknikak beharko lirateke (king size fans) [30], proba egiteko bideragarritasuna zailtzen duena. Beraz, BDT partzialak egitea erabaki zen "Detached-Unit method" oinarrituta [31]. Guztira, 37 lagin aztertzen dira eta 2.5. Taulan ezaugarri orokorrak laburbiltzen dira, kasu bakoitzako informazio geometrikoa barne. Emaitzak kasu bakoitzaren ezaugarri geometrikoen eta neurtutako hermetikotasun arteko harremana antzemateko



aztertu ziren. Nahiz eta kasu gehienek 40 eta 140 m² bitarteko azalera izan, airearen bolumenak nabarmeneko bariazioa dute kasuen arteko sabai altuera desberdinak direla eta. Dibertsitate handia dago, batez ere 2,2 eta 2,9 metroko arteko etxebizitzaren altuera beste erabilera batzuekin alderatzen denean, hala nola udaletxeko 6 metro baino gehiago duten kasuekin.

2.5. Taula- Kasu-azterketen ezaugarri konstruktiboak.

Erref. kasua	Azalera erabiltaria [m ²]	Perimetroa [m]	Bataz besteko sabaia altuera [m]	¹ Eraikin inguratz ailearen azalera [m ²]	Bolumena [m ³]	² Kontserbazio gradua (W; C;S;L;F)	Leiho azalera [m ²]	Leiho perimetroa [m]	Leiho perimetro erabilgarria [m]
1.A	60	39	2.56	222	155	3;3;1;1;1	10.6	34.3	42.3
2.A	44	36	2.87	191	126	1;2;1;1;1	6.9	22.5	27.3
3.A	49	36	2.83	201	138	3;3;1;1;1	7.4	23.6	29.5
4.A	68	41	2.86	254	195	3;2;1;2;1	13.1	38.6	49.3
5.A	46	37	2.85	198	131	3;2;1;2;1	6.9	19.0	25.0
6.A	71	44	2.57	254	181	1;2;1;2;1	13.3	39.0	50.4
7.B	73	40	4.21	314	309	2;3;1;2;1	27.8	55.8	83.7
8.B	73	38	3.80	292	277	2;2;1;2;1	26.1	50.5	75.8
9.B	100	46	4.80	420	482	2;2;1;2;1	28.4	59.5	89.3
10.B	73	38	3.38	275	247	2;2;1;2;1	24.3	51.0	76.5
11.B	74	42	3.38	288	249	2;2;1;2;1	20.3	42.5	63.8
12.B	54	32	3.37	215	182	2;2;1;2;1	12.2	25.5	38.3
13.C	15	17	2.72	76	42	4;4;2;1;2	6.1	14.1	21.3
14.C	49	28	2.87	179	141	4;4;2;1;2	12.2	25.0	35.8
15.C	55	44	2.72	228	148	4;4;2;2;2	12.4	43.2	56.3
16.C	48	30	2.71	177	130	4;4;2;2;2	4.1	14.4	18.8
17.C	48	30	2.72	177	130	4;4;2;2;2	4.1	14.4	18.8
18.C	55	44	2.72	228	148	4;4;2;2;2	12.4	43.2	56.3
19.C	17	18	2.72	82	45	4;4;2;2;2	4.1	14.4	18.8
20.C	134	73	2.71	467	363	4;4;2;2;2	22.0	76.8	100.0
21.C	104	50	3.71	396	387	4;4;2;2;2	36.0	84.1	122.0
22.C	134	71	3.63	526	488	4;4;2;2;2	45.0	105.2	152.6
23.D	102	49	2.88	345	293	3;1;1;2;1	26.5	84.4	106.9
24.E	62	34	5.08	297	313	3;4;2;2;1	26.3	35.6	55.1
25.E	62	34	5.08	297	313	3;4;2;2;1	26.3	35.6	55.1
26.E	89	51	2.32	295	207	3;4;2;2;1	14.3	28.6	28.6
27.E	63	35	2.52	214	159	3;4;2;2;1	16.2	27.9	42.5
28.E	63	35	2.55	215	161	3;4;2;2;1	16.2	27.9	42.5
29.E	59	33	4.62	272	271	3;4;2;2;2	27.2	43.6	61.7
30.F	107	61	2.48	366	267	1;2;1;1;1	23.5	59.0	73.1
31.F	69	36	6.37	366	442	1;1;1;2;1	32.8	52.4	81.2
32.F	75	39	6.42	397	480	1;1;1;2;1	19.2	26.5	39.8
33.F	47	31	3.22	193	151	1;1;1;2;1	16.0	32.3	44.8
34.F	12	16	3.43	78	42	1;1;1;2;1	3.0	7.1	10.2
35.F	52	34	5.30	287	278	3;2;1;2;1	9.4	12.4	29.2
36.G	55	34	2.72	204	150	2;3;1;2;2	11.9	35.2	43.8
37.H	58	36	2.19	199	128	1;2;1;1;2	7.1	22.9	28.7

¹ISO 9972 definizioaren arabera, eraikuntza edo eraikinaren aztertutako gela kanpotik edo beste eraikinetik baztertzeko duen muga.

²Leihoak (W): 1 Originala; 2 Originala mantenuarekin; 3 Berriak (instalazio estandarrekin); 4 Berriak (kalitate handiko instalazioarekin)

Kontserbazio egoera (C): 1 Originala; 2 Ondo mantendua; 3 Ondo mantendua eta berritua; 4 Erabat berritua

Egitura (S): 1 Egurra eta metalezko elementuak; 2 Hormigoizko egitura

Kokapena (L): 1 Goiko solairua, atikoa etab; 2 Tarteko solairua

Instalazioak (F): 1 Hormetan ezkututa; 2 Agerian

Azterketaren kasuak modu askotan sailkatu daitezke. Adibidez, gaur egungo kontserbazio egoeraren arabera, bi talde nagusi daude. Alde batetik, D, H eta G eraikinak gainazaleko aldaketa arinak egin dituzte, baita A eraikinaren kasu batzuk ere. Bestalde, C eta E eraikinek birgaitze maila handia erakusten dute. Behatutako eraikinen birgaitzen arabera, baieztatu dezakegu etxebizitzaren gehiengo kasuek azken hamarkadan erreformatu egin direla, leihoak ordeztuz eta inguratzailearen egitura egoera hobetzen. Aldi berean, eraikin publikoak oso gutxitan berritzen badira ere, kasu batzuetan erreforma sakonak ikus daitezke estalkien eta egituren

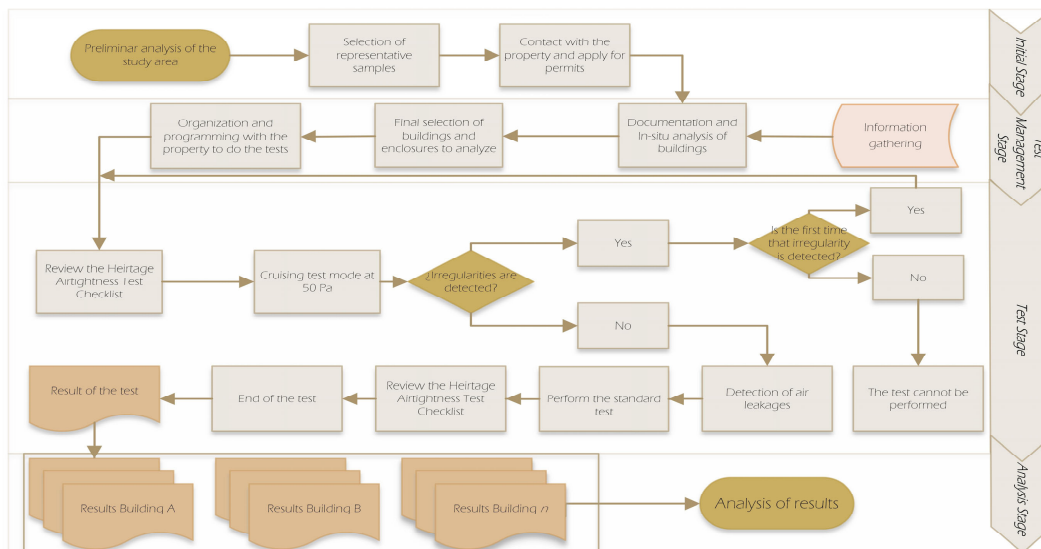
ordezkapenekin. Hau da, eraikin publikoen birgaitze kasuak gutxi izan arren, gauzatzen direnean inbertsio publikoa handia denez, oro har, burututako ekintzak era integralean egiten dira. Beste aldetik, aztertutako kasuetatik, ezin izan da inolako birgaitze integral izan duen egoitza-eraikinik aztertu, beharbada jabe guztien arteko akordioetara iristeko zailtasun handiak baitira, ekintza integralak burutzeko.

Eraikuntza sistemei dagokienez, aipatu beharra dago oso antzekoak direla, C eta E eraikinak izan ezik, barneko egiturak berriki gauzaturako birgaitzetan ordezkatu baitzuten. Leiho sistemei dagokienez, kasu gehienek egurrezko markoak eta beira sinpleak dituzten leiho originalak iraunarazten dute. Hala ere, denborarekin batera bere jatorrizko baldintzak hondatu egin dira. Hau da, batez ere, egurraren zahartzea eta asentu-mugimenduek eragindako distortsio geometrikoa dela eta.

2.4.1.4. Metodo esperimentalaren deskribapena

Metodologia eta probak burutzeko eman diren urratsak 2.6. Irudiko diagraman laburbiltzen dira. Lau fase desberdin osatzen dute.

Lehenengo fasea arestiko atalean aipatu den kasuen aukeraketan oinarritzen da. Fase honetan ere eraikinen jabeekin lehen kontaktuak egin dira entseguen baimenak lortzeko.



2. 6. Irudia- Hermetikotasun azterketan zehar jarraitutako metodologiaren fluxu-diagrama.

Hurrengo fasea, hermetikotasun probak burutu ahal izateko behar den kudeaketa orokorra biltzen du. Urrats hauek funtsezkoak dira emaitzen fidagarritasunerako oso garrantzitsuak baitira. Lehenik eta behin, eraikinen kasu egokienak aukeratzeko hurrengo detaileak kontuan hartu ziren: ikerketaren xedea, eraikinaren tamaina, kontserbazio egoera eta proba egin ahal izateko erabilgarritasuna. Bigarrenik, irisgarritasunaren eta egutegiaren arabera, probak egiteko egunak jabeekin

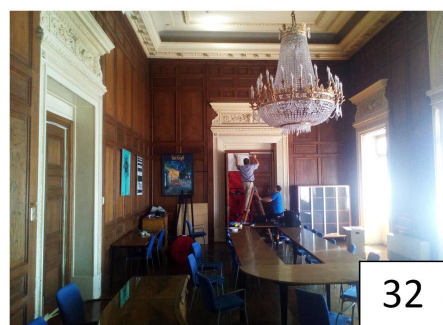
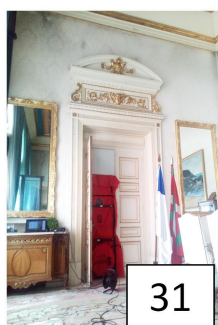
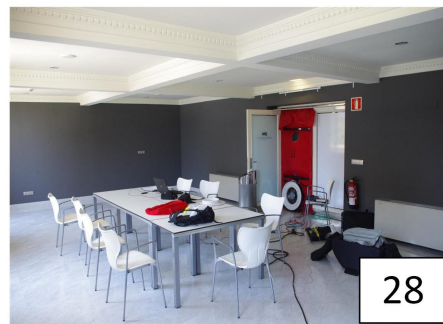
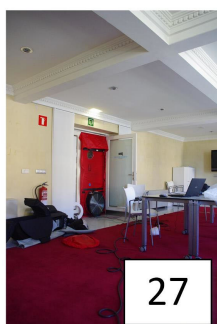
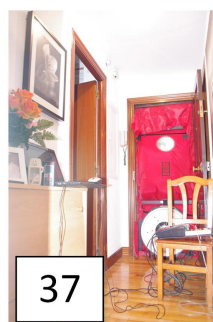
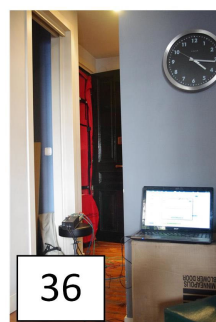
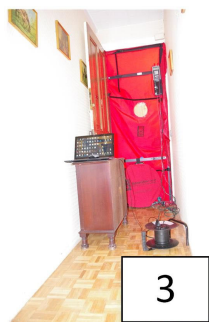
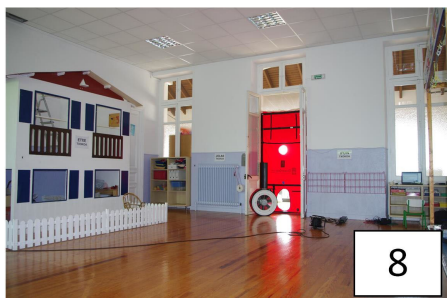


programatu ziren. Eraikin publikoetan erabakigarria izan zen puntu hau, eguneroko erabilera ezin baita eten eta probak jaiegunetan egin ahal izateko koordinatu ziren.

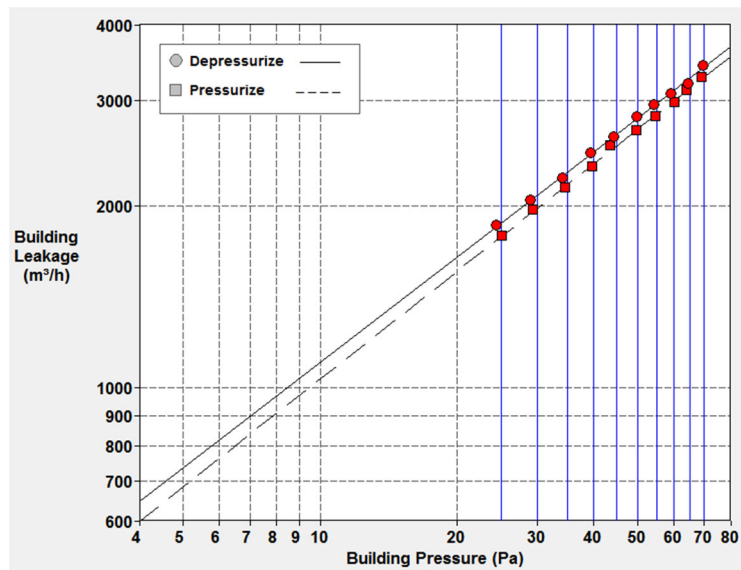
Hirugarren etapa BDTarekin eta bere prestaketarekin lotutako gai guztiekin datza. Testak Minneapolis Blower Door 4 Modeloarekin, 2.7.Irudian erakusten den bezala, eta ISO 9972an definitutako 1. Metodo prozedura jarraituz gauzatu ziren [32]. Fase hau konplexuenaz jotzen da, beharrezkoa den ekipamendu kopuru handiarengatik eta kontuan hartu behar diren urrats guztiengatik.

Araudiaren arabera, hermetikotasun proba presio-positiboan edo presio-negatiboan egin daiteke, 2. 8. Irudia. Azterketan, bi presio aukerak presio-balio desberdinetan burutu ziren aire-fluxuen eta presio-diferentzia arteko fidagarritasuna lortzeko. Kasu bakoitzaren hermetikotasun maila bere ezaugarri geometrikoen bidez eta gainpresio eta depresio entseguetan lortutako emaitzen bitartez erdiesten da.

Saiakuntzaren prozesuan, kasu bakoitzaren hermetikotasun arabera, haizagailuak kanpoko eta barruko arteko presio diferentzia bat lortzeko aire-emari kopuru zehatz bat sortu behar du. Aire-emari horren arabera, haizagailua uztai jakin batekin prestatu behar da neurketa egokiak lortzeko. Haizagailuak momentu bakoitzean sortzen ari duen aire-emari kopurua jakiteko presio sentsore baten bidez eta bihurketa-taula edo grafiko baten bidez burutzen da, 2.9 eta 2.10 Irudiak.



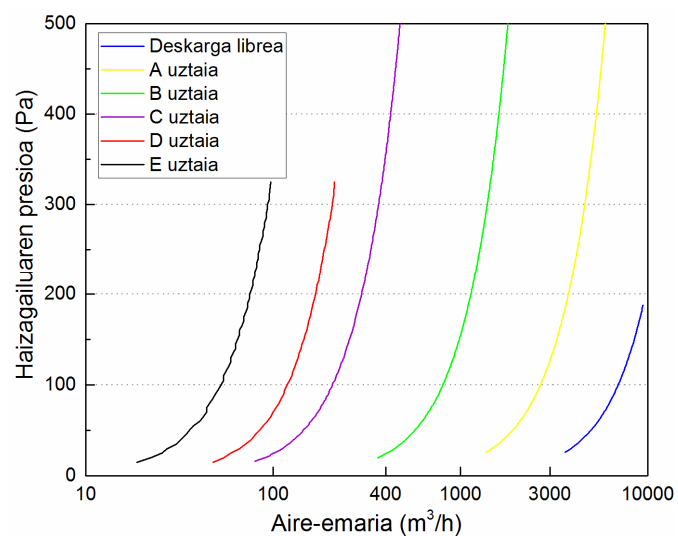
2. 7. Irudia- Kasu-azterketetan eginidako hermetikotasun entseguak (kasu bakoitzaren erreferentzia zenbakiarekin).



2. 8. Irudia- Blower Door Testaren emaitza grafikoa.



2. 9. Irudia- Minneapolis Model 4 haizagailuaren uztaiak (A-E) eta presio sentsorea aire-emaria kalkulatzeko.



2. 10. Irudia- Minneapolis Model 4 haizagailuaren kalibrazio prozesuan lortutako presioaren eta aire-emariaren arteko bihurketa-grafikoa erabilitako uztaiaeren arabera (kalibrazio fitxaren datuetatik datuekin garatuta).

Bihurketa taula edo grafiko hau aurretiko fabrikatzaileak egindako kalibrazio baten bidez lortzen da. Honek kurben faktoreak eman behar ditu neurtutako presioak aire-emarian bihurtu ahal izateko hurrengo espresioaren bitartez:

$$\dot{V}_r = C_c \cdot (\Delta p_v)^{n_c}$$

$$\dot{V}_m = f(\dot{V}_r) = \dot{V}_r \cdot \sqrt{\frac{1.204}{\rho_a}}$$

non:

\dot{V}_r = neurtutako aire-emari tasa, m³/h
 C_c = kalibrazioko aire-iragazpen koefizientea, m³/(h·Paⁿ)
 Δp_v = haizagailuaren presioa, Pa
 n_c = kalibrazioko aire-emari esponentea, (-)
 \dot{V}_m = aire-emari tasa, m³/h
 ρ_a = haizagailua zeharkatzen duen airearen dentsitatea, kg/m³

Beste aldetik, fabrikatzaileak haizagailuarentzat emandako kalibrazio koefizienteak erabilitako uztaien arabera honako hauek izan ziren:

Uztaia	C_c m ³ /(h·Pa ⁿ)	n_c (-)
Deskarga librea	745.3	0.4848
A	273.2	0.4952
B	81.68	0.4969
C	19.30	0.5157
D	12.31	0.5032
E	4.76	0.5166

Prozesu guzti DG-700 manometro diferentzialarekin eta TECTITE Express softwarearekin erregistratzen da. Ondoren, aire-emari tasaren zuzenketa egin behar da inguratzailetik zeharkatzen duen aire tasa depresio edo gainpresio kasuetarako hurrengo espresioen bidez:

$$\dot{V}_{env d} = \dot{V}_{m d} \cdot \left(\frac{\rho_i}{\rho_e}\right)$$

$$\dot{V}_{env g} = \dot{V}_{m g} \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_i}\right)$$

non:

$\dot{V}_{env d/g}$ = inguratzailea zeharkatzen duen aire-emari tasa depresio edo gainpresio kasuan, m³/h
 $\dot{V}_{m d/g}$ = kalibrazioko aire-iragazpen koefizientea, m³/(h·Paⁿ)
 ρ_e = kanpoko airearen dentsitatea, kg/m³
 ρ_i = barruko airearen dentsitatea, kg/m³



Aire-emaria presio diferentzia pasu bakoitzean lortu ondoren, V_{env} balioen eta karratu minimoen bidezko doiketa teknika baten bidez C_{env} eta n baloreak lortzeko hurrengo espresioa erabili behar da:

$$\dot{V}_{env\ d/g} = C_{env\ d/g} \cdot (\Delta p)^n$$

non:

$C_{env\ d/g}$ = aire-emari koefizientea depresio edo gainpresio kasuan, $m^3/(h \cdot Pa^n)$

Δp = eragindako presio aldea, Pa

n = aire-emari esponentea depresio edo gainpresio kasuan, (-)

Orain arte aipatutako parametroak saiakuntza burutu zen momenturako kalkulatu daude. Beraz, espresioa baldintza normalentzako ($20 \pm 1^\circ C$ eta $1.013 \cdot 10^5$ Pa) egokitu behar da. Helburu hori lortzeko C_{env} parametroa C_L bihurtu daiteke airearen dentsitatea saiakuntzaren baldintzetan eta baldintza normaletan kontuan hartuta:

$$C_{L\ d} = C_{env\ d} \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_o}\right)^{1-n}$$

non:

$C_{L\ d/g}$ = aire-emari koefizientea depresio edo gainpresio kasuan, $m^3/(h \cdot Pa^n)$

$$C_{L\ g} = C_{env\ g} \cdot \left(\frac{\rho_i}{\rho_o}\right)^{1-n}$$

ρ_o = airearen dentsitatea baldintza normaletan, kg/m^3

Horrela, hermetikotasun saiakera deskribatzen duen azkeneko espresioa hurrengoa da:

$$\dot{V}_L = C_L \cdot (\Delta p)^n$$

non:

V_L = iragazitako airearen tasa depresio edo gainpresio kasuan, m^3/h

C_L = aire-iragazpen koefizientea depresio edo gainpresio kasuan, $m^3/(h \cdot Pa^n)$

Δp = eragindako presio aldea, Pa

n = aire-emari esponentea depresio edo gainpresio kasuan, (-)

Behin iragazitako aire tasaren espresioa lortuta eta aztertutako kasuaren ezaugarri geometrikoak jakinda, hermetikotasun-adierazleak kalkulatu daitezke, 2.6.Taula. Adierazle baten edo beste baten erabilera aplikazio-eremuaren arabera da, aire aldaketa-tasa n_{50} normalean gehien erabiltzen dena izanez.

2.. 6. Taula- Hermetikotasun-adierazleak.

Hermetikotasun-adierazlea	Ekuazioa	Unitateak	Aplikazio-eremu
Iragazitako airearen tasa	$V_{\Delta p} = C_L \cdot \Delta p^n$	m ³ /h	
Aire aldaketa-tasa	$n_{\Delta p} = \frac{Q_{\Delta p}}{V}$	h ⁻¹	Passivhaus, Hego Europa, Hego Amerika, Txina
Ihes-tasa espezifikoa	$w_{\Delta p} = \frac{Q_{\Delta p}}{A_F}$	m ³ /h m ²	Suedia, Danimarka
Aire iragazkortasuna	$q_{\Delta p} = \frac{Q_{\Delta p}}{A_E}$	m ³ /h m ²	Iparaldeko Europa, Irlanda, Erresuma Batua, Frantzia, Kanada
Aire ihesen baliokide-azalera (ELA-EqLA)	$A_L = Q_{\Delta p} \frac{\sqrt{\rho/2\Delta p}}{C_p^*}$	m ²	LBL eta AIM infiltrazio eredurentzat.

*Non $C_p=1$ ELA eredurako 4 Pa-etan eta $C_p=0.61$ EqLA eredurako 10Pa-etan.

Azken fasean, kasu bakoitzeko emaitzak aztertu ziren eraikin bakoitzeko aire-filtrazioen portaeraren ezaugarriak zehazteko. Horrez gain, hainbat datu-korrelazio ebaluatu ziren eraikin historikoen hermetikotasun joerak identifikatzeko, hala nola hermetismoaren balioa eta kasu bakoitzaren ezaugarri geometrikoak.

2.4.1.5. Emaitzak eta eztabaida

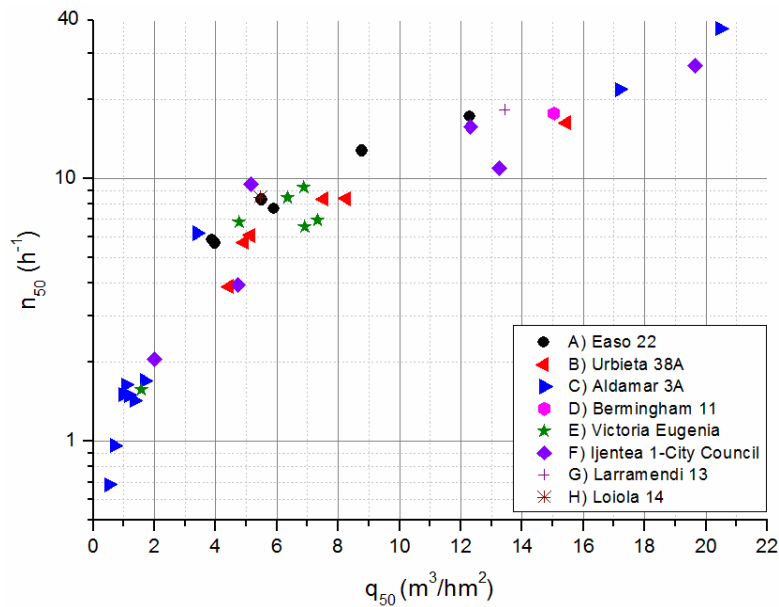
Aztertutako 37 kasuen emaitza nagusiak 2.7.Taulan laburbiltzen dira, baita baldintza klimatikoak eta hermetikotasun-adierazleak ere. Emaitzen sailkapena eraikin bakoitzaren arabera 2.11.Irudian aurkezten dira. Analisisien zati nagusia n_{50} eta q_{50} adierazleetan oinarritzen da, eraikuntzako sektorean adierazle hauen erabilera nabarmena direla eta.

Emaitzen deskribapen orokorrak estankotasun balioen sakabanaketa handia eta maximoen eta gutxien balioen arteko aldea erakusten du. Emaitza desberdinak izan arren, n_{50} balioen bi herenak 3 h⁻¹etik 20 h⁻¹ bitartekoak dira, %67,6 hain zuzen ere. Analisi orokor honek beste ikerketetan aurkitutako emaitzekin alderatuta desberdintasun garrantzitsua adierazten du [21-29]. Ikerketa hauetakotik batek ez du hermetikotasun maila hain txikia aurkeztu, eraikin historikoak zehazki ebaluatzen dituzten ikerketek izan ezik [11,12]. Eraikin historikoetan egindako ikerketen emaitzak alde batera utzita, kasu bakarra dago [26], zeinaren batez besteko hermetikotasun emaitza ikerketa honetan lortutako balioa gainditzen duen. Beraz, emaitzen analisi orokor batetik ondorioztatu dezakegu ebaluatutako eraikitako ondarearen kasuen hermetikotasuna txikiagoa dela eraikin berrien aldean.



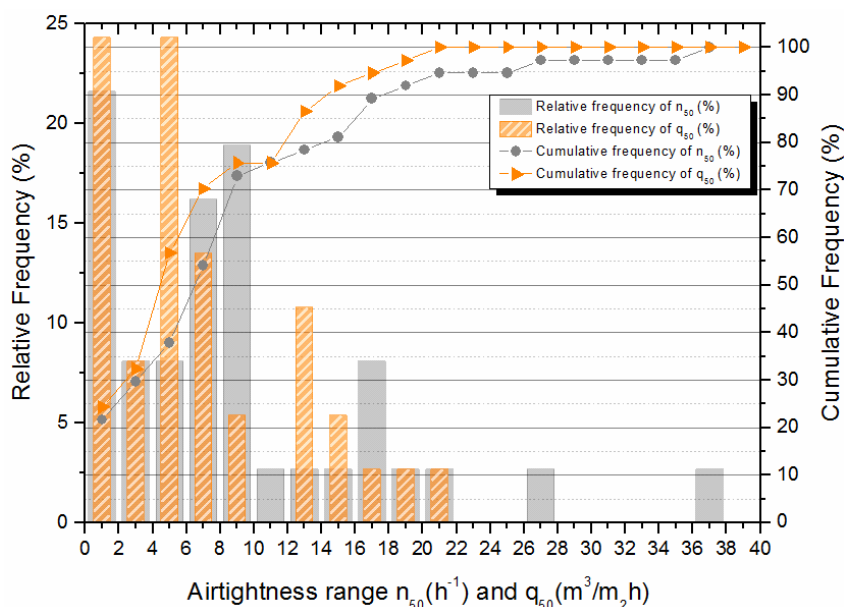
2.7. Taula- Kasu-azterketen airearekiko hermetikotasun saiakuntzen emaitzak.

Erref.	Barruko temperatura [°C]	Kanpoko Temperature [°C]	Aire-emari koefizientea [m ³ /h Pa ⁿ]	Aire-emari esponentea [-]	V ₅₀ [m ³ /h]	n ₅₀ [h ⁻¹]	w ₅₀ [m ³ /hm ²]	q ₅₀ [m ³ /hm ²]
1.A	17.5	17	80,9	0,611	881	5.69	14.57	3.97
2.A	18.2	16.5	77,6	0,666	1049	8.31	23.84	5.50
3.A	18.6	20.6	202,6	0,555	1761	12.78	36.18	8.78
4.A	13.8	13	140,1	0,607	1500	7.68	21.95	5.91
5.A	13	13	69,3	0,614	765	5.85	16.68	3.87
6.A	14.2	13.7	318,0	0,585	3125	17.24	44.29	12.28
7.B	25.5	25.3	297,5	0,554	2596	8.40	35.36	8.27
8.B	24.8	25.8	395,2	0,622	4507	16.30	61.93	15.45
9.B	24	24.1	186,5	0,589	1868	3.87	18.59	4.45
10.B	24.4	23.2	211,9	0,581	2063	8.36	28.26	7.51
11.B	25.2	24.9	132,9	0,606	1420	5.71	19.28	4.93
12.B	24.8	24.3	105,1	0,602	1105	6.08	20.47	5.13
13.C	24.7	23.1	153,7	0,591	1550	37.12	100.98	20.46
14.C	27.6	25.3	263,0	0,633	3076	21.79	62.55	17.17
15.C	25.6	24.5	18,8	0,655	243	1.64	4.45	1.07
16.C	24.6	23.5	10,9	0,625	125	0.96	2.61	0.71
17.C	25.6	24.3	7,8	0,624	89	0.68	1.86	0.50
18.C	26.8	27.6	17,5	0,652	224	1.51	4.10	0.98
19.C	28.1	29.1	26,8	0,600	279	6.19	16.84	3.39
20.C	26.5	29.5	50,5	0,608	543	1.50	4.05	1.16
21.C	27.1	33.2	63,7	0,597	659	1.70	6.31	1.66
22.C	27.5	31.3	60,9	0,628	699	1.43	5.20	1.33
23.D	27.3	26	533,8	0,581	5184	17.69	50.94	15.04
24.E	23.3	26	242,4	0,561	2174	6.95	35.30	7.32
25.E	25.1	22	228,2	0,561	2049	6.55	33.27	6.90
26.E	26.5	21.5	105,5	0,662	1407	6.81	15.80	4.77
27.E	24.4	22.8	162,6	0,564	1472	9.25	23.31	6.87
28.E	28.8	30.3	136,9	0,588	1366	8.48	21.63	6.35
29.E	24.5	21	33,8	0,649	427	1.57	7.27	1.57
30.F	25.4	19	794,8	0,564	7190	26.95	66.93	19.63
31.F	23	24.7	128,6	0,666	1734	3.93	25.02	4.74
32.F	24.2	27.5	481,3	0,613	5253	10.95	70.31	13.24
33.F	26.9	29.2	247,9	0,578	2378	15.77	50.77	12.32
34.F	25.8	26.3	36,7	0,610	399	9.52	32.65	5.14
35.F	25.5	21	64,2	0,560	571	2.06	10.90	1.99
36.G	22.6	22.4	278,1	0,586	2744	18.26	49.67	13.44
37.H	23.4	22.9	97,9	0,616	1089	8.51	18.66	5.46



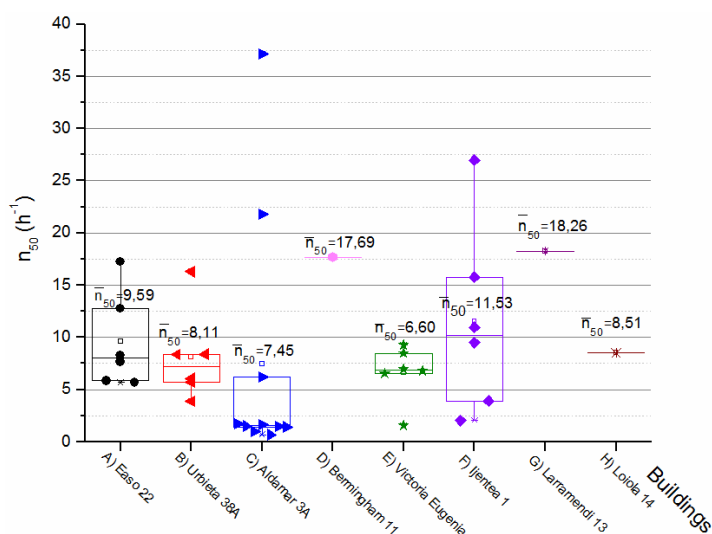
2. 11. Irudia- Aztertutako kasuen aire hermetikotasun entsegu emaitzen distribuzioa aire truke-tasa eta airearekiko iragazkortasunaren bidez 50 Pa-etan.

Kasu guztien batez besteko airearen berritze-tasa emaitza $n_{50}=9.03 \text{ h}^{-1}$ da. Hermetikotasun balioen maiztasun analisia, 2.12.Irudian, n_{50} balio ohikoenak $0-2 \text{ h}^{-1}$ tartean direla erakusten du. Hala ere, maiztasun erlatibo honek ez du zehatz-mehatz azterketa osoa irudikatzen, izan ere, C eraikinaren emaitzek maiztasun honetan eragina du hutsaltzen duelako hein batean lortutako baloreak. Hau da, eraikin honetan garatutako kasu kopurua handia izan zen, lortutako hermetikotasun kalitate handia konfirmatzeko, beraz, emaitza gehiago edukitzearren eraikin honek pisu gehiago lortzen du emaitza orokorrean. $6-8 \text{ h}^{-1}$ eta $8-10 \text{ h}^{-1}$ tartekak zehaztasun handiagoz deskribatzen dute aztertutako tipologia, neurketa horiek eraikin ezberdinak irudikatzen baitituzte. Emaitzak hiru talde nagusitan sailkatu daitezke: %30 inguru kasuak $0-4 \text{ h}^{-1}$ arteko emaitzak erakusten dute, %50 kasuei dagokionez $4-16 \text{ h}^{-1}$ artean eta gainerako %20 $16-38 \text{ h}^{-1}$ inguruan.



2. 12. Irudia- 50 Pa-etan aire iragazkortasunaren eta aire truke tasaren analisi estatistikoa maiztasun erlatibo eta metatuan oinarrituta.

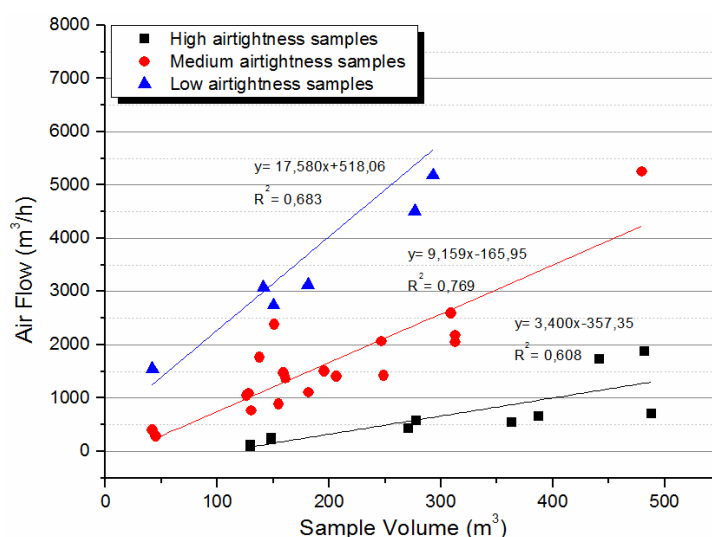
2.13.Irudian kaxa eta bibotezko diagrama batekin eraikin bakoitzaren emaitzak erakusten dira. Lagin kopuru handia duten kasuek, A, B, C, E eta F eraikinek, batez besteko balioak $6.60-11.53 \text{ h}^{-1}$ artekoak dira. Honek erakusten du kasu anitz azertu diren eraikinen hermetikotasun batezbestekoak ikerketan lortutako 9.03 h^{-1} batezbestekoaren %30aren bariazioaren barnean daudela. Kaxa eta bibotezko estatistikoko diagrama oso erabilgarria da arestian aipatutako muturreko balioak ikusteko. Kaxen biboteak ez dira balio horietara iristen, eta eraikin bakoitzeko kuartilarteko (IQR) baloreekin alde esanguratsua islatzen dute. Muturreko balio hauek eraikin bakoitzaren portaera orokorrarekin bat ez etorriagatik, eraikitako ondarean aurki daitekeen ohiko emaitzaz ohartarazten dute.



2. 13. Irudia- Aztertutako kasuen estankotasun analisia haxa eta bibotezko diagrama erabiliz eraikinaren arabera sailkatuta.

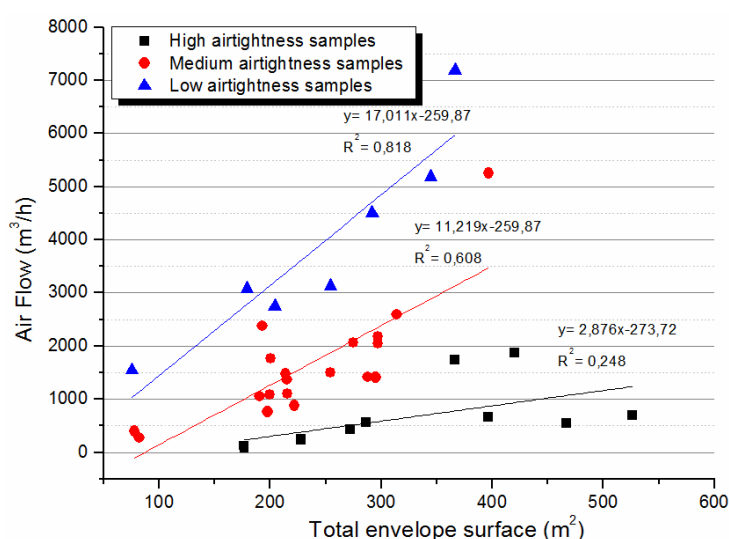
Ondoren, lortutako emaitzen bitartez eraikitako ondarearen aire estankotasunarekiko kasu bakoitzeko ezaugarri geometrikoekin erlazioa bilatuko da. Kasu-azterketen ezaugarrien eta lortutako hermetikotasun adierazleen arteko korrelazioa hasiera batean kasu-multzo oso bat bezala ebaluatu zen eta, ondoren, antzekotasun-portaeraren arabera ordenatu ziren taldeetan aztertzeko. Kasuak lehen antolatu diren bezala aztertuko dira, hau da, hermetikotasun baxukoak (% 20), tarteko hermetikotasunekoak (% 50) eta hermetikotasun handikoak (% 30).

Lehenengo konparazioan, airearen fluxua aztertutako kasuen bolumenarekin lotzen da. Azterketa orokorraren emaitzek ez dute joera nabarmenik erakusten. Hala eta guztiz ere, emaitzak bereizita beren estalduraren arabera ebaluatzen badira, talde bakoitzak airearen fluxuaren eta kasu bakoitzaren bolumenaren arteko korrelazio egokia erakusten du, 2.14.Irudian ikus daitekeen bezala. Hiru talde hauek portaera desberdinak eskaintzen dituzte, ingurutzailaiek airearen fluxuari eskaintzen dioten erresistentzia desberdinak direla eta. R^2 determinazio-koefizienteak optimoak ez izan arren, bi parametroen arteko lotura estua erakusten da, batez ere ertain eta baxuko hermetikotasun kasuetan.



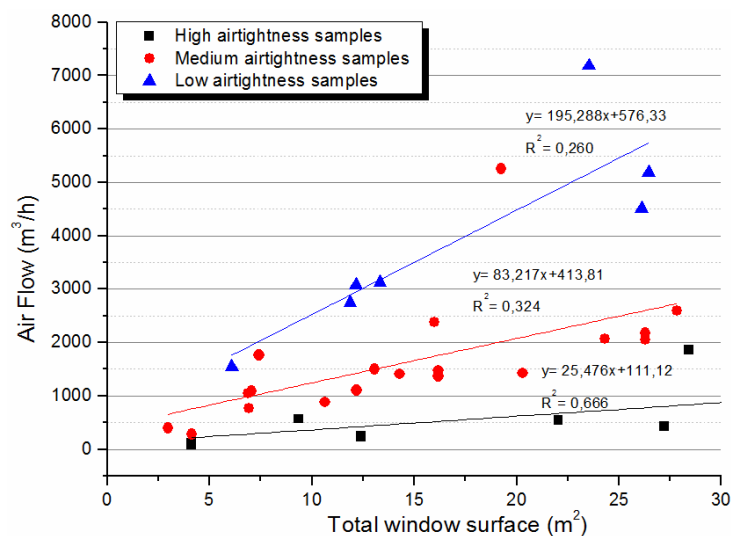
2. 14. Irudia- Aire fluxuaren eta aztertutako kasuen bolumen arteko korrelazioa identifikatutako estankotasun mailen arabera.

Bi talde hauen doitze egokiago baten bitartez, badirudi kasuen ezaugarri geometrikoak duten efektua hermetikotasun txikiko eta ertaineko kasuetan hermetikotasun handikoetan baino inpaktu gehiago dutela. Horregatik, bigarren korrelazio bat burutu zen aire fluxuaren eta ingurutzailaren azaleraren artean. Egiaztatu zen, 2.15. Irudian jasotako talde bakoitzaren emaitzak kontuan hartuta, ingurutzailaren azaleraren eta aire fluxuaren arteko lotura sendoa dagoela. Hermetikotasun baxuko kasuek ertaineko hermetikotasun kasuak baino erlazio gehiago erakusten dute ingurutzailaren azalerarekin, R²ren balio handiagoa dela eta. Hala eta guztiz ere, hermetikotasun handiko kasuek ez dute zerikusirik ingurutzailaren azalerarekin.



2. 15. Irudia- Aire fluxuaren eta aztertutako kasuen ingurutzailaren azaleraren arteko korrelazioa identifikatutako estankotasun mailen arabera.

Gainera, korrelazio berriak detektatzeko kasuak 2.5.Taulako beste ezaugarri geometrikoekin aztertu ziren, hala nola leihoen azalerekin, perimetroekin eta perimetro erabilgarriekin. Ezaugarri gehienek ez zuten korrelaziorik eskaintzen. Hala eta guztiz ere, hermetikotasun handiko taldea korrelazio oso esanguratsua erakutsi zuen airearen fluxuaren eta leihoen azaleraren artean, 2.16.Irudian ikus daitekeen moduan. Azken irudi honek aurreko hermetikotasun handiko kasuen inguruko aurreko iritziak berresten ditu. Hau da, kasu hauek ez dutela geometria orokorrarekin lotura askorik, baizik eta eraikuntzako ezaugarriekin zerikusi estuagoa dute, leihoen azalarekin bezala.



2. 16. Irudia- Aire fluxuaren eta aztertutako kasuen leiho azaleraren arteko korrelazioa identifikatutako estankotasun mailen arabera.

Entseguak burututakoan, aire-ihesak eragiten zituzten ohiko arazoak identifikatu ziren. Eraikin historikoetan espero zen bezala, aztertutako kasuek ez zuten inolako hermetikotasun diseinurik ezta eraikin modernoetan aurki daitezkeen material berezirik, hala nola mintz hermetikoak, zinta aurrekonprimituak edo apar bereziak. Beraz, detektatu ziren aire-ihesak nagusiak ohikoak izan ziren eta ondoren aipatzen dira:

- Leihoak, bereziki horma eta markoen arteko junturetan eta pieza mugikorretan, esate baterako, burdineri elementuak.
- Ingurutzaileretan sortutako irekiduretan, batez ere instalazioentzat egindako sarrera nagusiak (ur-hornidura, saneamendua, gasa eta aireztapena).
- Elementu elektrikoak (koadro elektrikoak, entxufeak, etengailuak eta argiztapen puntuak)
- Lurzoruaren asentuek hormetan sortutako arrailak edo egurrezko egituren mugimenduek sortutako hutsuneak.
- Zokaloak eta lurzoruaren egur-taulen arteko junturak.

Kasu nabarmenei dagokionez, hala nola hermetikotasun txikia duten kasuek, n_{50} balio maximo gehienak azkeneko solairuetan aurkitu ziren, hala nola, 30F, 13C eta 14C kasuak. Baliteke honen arrazoia kasu gehienetan estalkien aire-estankotasunarekiko diseinu faltari dela. Adibidez, 30F kasuaren espozioa beste kasuek baino handiagoa da, kanpoalderako irekiduraz beteta duen ganbara baten azpian kokatuta dagoelako, 2.17. Irudia. Sabaia, hain zuzen ere, ganbara eta aztertutako gela banatzen zuen "geruza hermetiko" bakarra zen. Horrez gain, argi puntuen eta aireztapen irekiduren juntadurak sabaiarekin airearen filtrazioa asko errazten zuten.



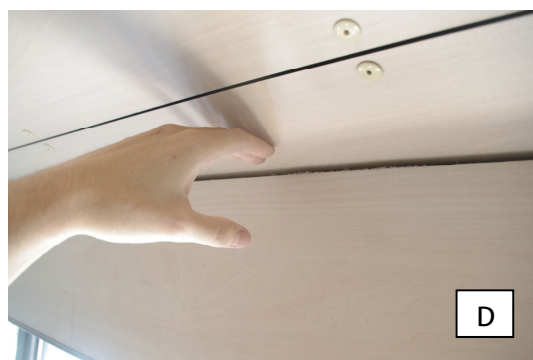
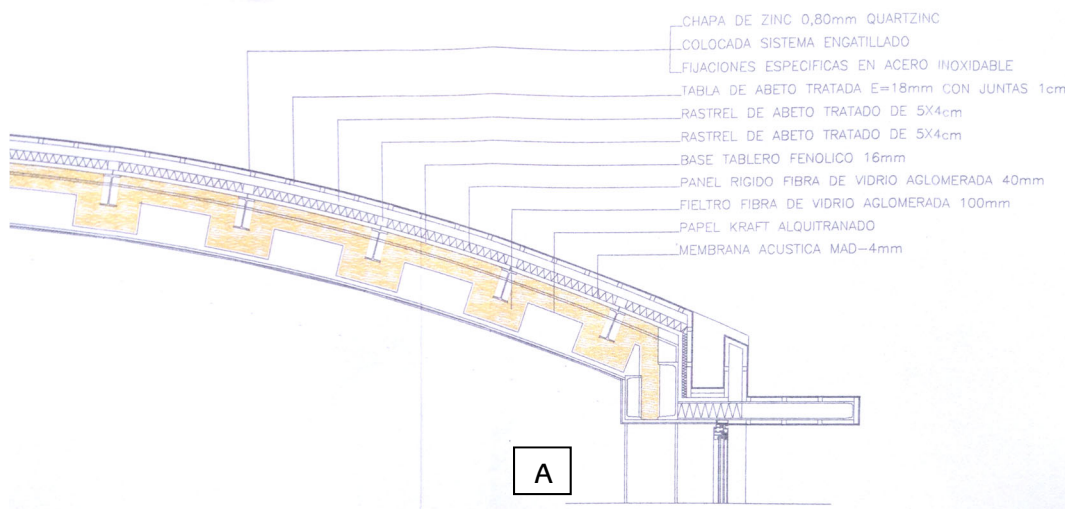
2. 17. Irudia- 30 F kasuaren gaineko ganbara eta sabaiaren zuloak.

Beste kasu batzuetan, 13C eta 14C bezalakoak, gelak jatorrizko eraikin originalaren gainean eraiki zen lebante berri batean kokatuta daude. Azken solairu honek, burdinazko egitura dauka eta barruko sabaia errematxatutako erretxina panelekin estalita dago eta kanpoko geruza zinkezko estaldurarekin osatuta dago, 2. 18. Irudia. Eraikuntza-sistema honek aire fluxuari erresistentzia txikia eskaintzen dio, batez ere eraikin berean beste itxitura batzuekin alderatuz. Hala ere, goiko solairu guztiek ez dute portaera bera. 1A, 2A, 3A eta 37H kasuek ez dute airearekiko erresistentzia hain ahula erakusten, n_{50} balioak 5 h^{-1} eta 13 h^{-1} bitartekoak dira.

Bestalde, kasu hermetikoenak C eraikinaren kasu batzuk eta 29E kasua dira. Arestian aipatu bezala, bi eraikin hauek birgaituta daude, egitura aldatuz eta leihoak beste berrieekin ordezkaturik. Aldaketa sakon hauek eraikinen hermetikotasun mailan erabateko garrantzia izatea lortu dute, batez ere beste eraikinekin konparatzen bada. Alabaina, inguratzailearen elementu baten aldaketa ez du nahitaez esan nahi hermetikotasun maila hobetzea lortuko duela. Azken ikerketa batek erakutsi du nola leiho zahar batzuen aldaketak leiho berri batzuegatik paradoxikoki hermetikotasun maila murriztea lortu zuela kalitate gutxiko instalakuntzagatik [33]. C eta E eraikinetan, egurrezko egitura hormigoizko berri baten aldaketari eta fatxaden berritzeari esker asko murriztu zen eraikinen jatorrizko aire-ihesak. Gainera, 35F, 9B



eta 31F kasuek ere hermetikotasun handia dute instalazioen presentzia eskasari eta eraikuntza sistema hermetiko originalari esker.



2. 18. Irudia- C eraikinaren estalkiaren ezaugarriak: A) Xehetasun-konstruktiboa B) Sabaiaren akabera C) Estalkiaren akabera D/E) Aire-ihesen detekzioa.

Ustekabekoa izan zen E eraikinaren kasu askotan hermetikotasun baxuko emaitzak lortzea eraikina erabat birgaituta kontuan izanda, C eraikina bezala. Arrazoiak 29Eren proban aurki daitezke, hau da, estankotasun handiagoa erakusten du, seguruenik hormen pitzaduren, korronte-harguneen eta kutxa elektrikoaren gabeziak direla eta. C eraikuntza eta 29E laginaren ezaugarriak berraztertzen baditugu, kasu hauek azaleko instalazio elektrikoak, kanalak eta hodiak, zituztela ikus daitezke. Honek hormetan

zehar irekiduren murrizketa lortzen du eta, juntaduren arretarekin batera, hermetikotasun maila handia lor daiteke. Hala eta guztiz ere, E eraikuntzaren gainerako kasuek portaera guztiz desberdina dute. Kasu hauetan, lotura handia detektatu zen kasuen hermetikotasun murrizketa eta hormetan zulaketen presentzia artean.

2.4.1.6. Ondorioak

Ikerketa honek eraikitako ondarearen aire estankotasunarekiko datu-base sortzearen hasierako helburua bete du. Guztira 37 azterketa kasu burutu ziren 8 eraikin ezberdinetan.

Probatutako kasuek anitz hermetikotasun mailak erakutsi zuten. n_{50} adierazlearen emaitzak $0,68 \text{ h}^{-1}$ balio minimotik $37,12 \text{ h}^{-1}$ balio maximora, eta q_{50} ren azdierazlearen kasuan $0,50 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ minimitoik $20,46 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ maximora. Hiru hermetikotasun maila identifikatu ziren maiztasun analisiaren arabera: hermetikotasun altuko kasuak, hau da 4 h^{-1} balioaren azpitik lortu zutenak, %30en kasuak izan ziren, beste aldetik, hermetikotasun ertaineko kasuak %50a dira eta 4 h^{-1} eta 16 h^{-1} balioen arteko emaitzak erakutsi zuten, azkenik hermetikotasun baxuko kasuak 16 h^{-1} eta 38 h^{-1} ko arteko balioak erakutsi zuten eta kasu guztien %20a izan ziren.

Aztertutako laginen batez besteko hermetikotasuna $n_{50}=9.03 \text{ h}^{-1}$ eta $q_{50} = 7.01 \text{ m}^3/\text{h m}^2$ izan zen. Hala ere, emaitza hauetan eragin garrantzitsua izan dute aipatutako maximo eta minimo balioen dispersioa. Eraikinen mailan, batez besteko balioak ere antzekoak dira. 8 kasuetako 5 eraikinen batezbesteko hermetikotasuna kasu guztien batezbesteko balioaren inguruko emaitzak erakutsi dute, n_{50} 6,60 eta $11,53 \text{ h}^{-1}$ arteko emaitzekin eta q_{50} 4.84 eta $9.51 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ artekoak. Batez besteko adierazgarria lortzeko 5 eraikin hauetan azterketa-kasu ugari entseatu ziren. Hori dela eta, ikerketa honetan eraikin historikoetan lortutako hermetikotasun emaitzak beste ikerketetan argitaratutako gaur egungo eraikinen hermetikotasun balioekin alde handia dagoela erakusten dute.

Aztertutako eraikin askok beste ikerketetan eraikitako ondarean lortutako emaitzekin alderatuta nabariko desberdintasunak erakusten dute. Honen arrazoia eraikin morfologiaren desberdintasunengatik izan liteke, beste ikerketetan eraikuntza txikiagoak aztertu ziren bitartean, ikerketa honetan garatutako azterketak eraikin handien geletan arreta jarri zen.

Azterketaren hermetikotasun gutxien duten kasuak goiko solairuetan edo estalkipean aurkitzen dira. Alabaina, adierazpen hau ez da beti egia, zeren eta, aztertu ahal izan den bezala, asko eragiten duten beste hainbat faktore daude. Gainera,



infiltrazio-tasa altuena erakutsitako kasua, paradoxikoki, aztertutako eraikin hermetikoenean dago.

Ikusi den bezala, goiko solairu kasu gehienek airezko ihesak garrantzitsuak dituzte, eta emaitza honen arrazoia sabaietan erabiltzen diren soluzio konstruktiboengatik da. Hau da, sabaietan hermetikotasuna lortzea, juntura konstruktibo ugari direla eta, zailagoa da, batez ere Erdiko solairuen harlanduzko hormekin konparatuta. Oro har, aire-ihesei aurkako erresistentzia handiagoa lortzen dutenek birgaitutako eraikinak dira. Eraikin batek, junturetatik, sabaietatik eta zoruetatik infiltrazioen murrizketa lortu du hormigoi armatu egitura berri baten bidez jatorrizko egurrezko egitura ordezkatzuz.

Hainbat korrelazio detektatu dira aire-fluxua eta gelen ezaugarri nagusien artean, ez kasuen multzo osoarekin, baizik eta identifikatutako hiru hermetikotasun mailen arabera. Hermetikotasun txikiko kasuek ingurutzaileraren azalerarekin erlazionatuta daude, hermetikotasun ertaineko kasuak barne-bolumenarekin lotuagoa daude eta hermetikotasun handiko kasuak leihoen azalerarekin lotura dute batez ere.

Ondorio gisa bezala, ikerketak eraikitako ondarearen hermetikotasun mailaren egoera ikustaraztea ahalbidetu egin du. Nahiz eta kasu gehienek hermetikotasun maila oso baxua eskaini arren, eraikin tipologia honen birgaitzek hermetikotasuna hobetu dezaketela erakutsi dute. Era honetan, aire-ihesen kontrolaren eta diseinu egokien bitartez, eraikitako ondarearen eraginkortasun energetikoa nabarmenki hobetzea posible bihurtzea lortu daiteke.

2.4.2. Opaku osagaiaren karakterizazioa

2.4.2.1. Sarrera

Eraikinen ingurutzailer termikoen karakterizazioa garrantzi handiko gaia bihurtu da eraikinen portaera termikoa aztertu ahal izateko. Arreta honen arrazoia ingurutzailer termikoak bero galeretan duen pisuagatik da. Lehenik eta behin kontuan izan behar da hauek bi osagaiez osatuta daudela, alde opakua eta alde erdigardena. Hau da, alde batetik hormak, zoruak eta estalkia eta bestetik leihoak.

Leihoak, elementu konposatu bat izan arren, instalazio prozesuan elementu bakarra bezala kontuan hartu daiteke. Hau da, birgaitze energetikoen kasuan, leiho aldaketa batean besterik datza. Bere instalazioak sortutako zubi higrtermikoen eragina baztertuz, elementu honek ez du eraginik gainerako ingurutzaileran, horma baten gainean isolamendua gehitzearen kasuan ez bezala. Era honetan, bere ondorioa eraikin osoaren azterketa termikoan erraz burutu daiteke fabrikatzaileek esakintzen duten ezaugarri termikoei esker.

Elementu opakuen azterketari dagokionez, oro har, eraikuntzako sektorean ISO 6946ak [34] aurkezten duen prozedura oinarri bezala hartzen da eta ondorioz materialen eroankortasun termikoaren datua edukitzea ezinbestekoa bihurtzen da. Horretarako taulatutako balioak [35] edo saiakuntzen bitartez [36] lortutako emaitzak erabil daitezke. Kasu gehiengoetan, batez ere proiektugileen kasuan, lehengo metodoa erabiltzen da eta bigarren metodoa fabrikatzaileek erabiltzen dute beraien materialen ezaugarri teknikoak eskaintzeko.

Eraiki egingo den eraikin bat aztertzerakoan, normalean ez dago zailtasunik datu hauek lortzeko erabiltzen diren materialen fitxa teknikoetan ezaugarriak eskuragarri daudelako. Hala ere, lehendik dauden eraikinen eta batez ere eraikitako ondarearen kasuan karakterizazio hau zaildu daiteke. Alde batetik eraikin mota hauek duela urte asko eraikita izatearren ezaugarri konstruktiboen informazio gabezia garrantzitsua izan daiteke, hala nola, erabilitako materialak, eraikitzeko teknikak edo hormen lodiera. Beste aldetik erabilitako material gehienak naturalak dira eta oro har, eraikinen inguruan eskura errazeko materialak erabiltzea arrunta zen. Beraz, leku desberdinen eraikinen eraikitzeko teknikak berdinak izan arren, kasu bakoitzeko erabilitako leku materialen desberdintasuna dela eta, materialen ezaugarri berdinak erabiltzea eragozten du. Hori dela eta, material hauen ezaugarri teknikoak eskuratzea ez da ohikoena, beraz bere zehaztapena eraikin mota hauen esku-hartzeen gako bihurtzen da.

Azterketa-eremuan zentratuz, eraikin mota honen inguratzaileen osaera orokorra hurrengo da:

- Horma nagusiak: lodiera aldakorreko hormak solairuaren altueraren arabera, 40 eta 70 cm artekoak izaten ohi dira, 2. 19. Irudia. Osaketa mistokoak, kanpoaldeko geruza Igeldoko hareharrizko harlanduak osatzen dute eta barruko geruza Markinako kareharrizko eta Igeldoko hareharrizko harlangaitz-mistoaz osatuta dago. Bi geruzak elkartuta daude hareharrizko harlanduekin; horrela hauek, giltzak bezala, trabatzeko funtzioa betetzen dute, 2. 20. Irudia. Azkenik, barrualdeko akabera 2-3 cm-ko igeltsu luzituarekin izaten ohi da, hala ere batzuetan harlangaitzeko harriak ikusgai uzten dira.
- Uharte-patioen horma: kaletik horma ez ikusgai izateagatik, horma hauek ez dute horma nobleen itxura noblea. Beraz, kasu hauetan kanpoko akabera margotutako emokadurarekin bukatzen da. Lodiera dagokionez, horma nagusia bezalakoa izaten da eta baita ere altueraren arabera.
- Argi-patioen hormak: aurreko bi horma ez bezala, hauek ez dute sostengu-funtzioa, beraz, ez dute karga handiak jasateko beharra eta, ondorioz, bere

konposizioa nabarmen aldatzen da beste kasuekin alderatuta. Adreilu huts bikotzako luzekako aparailua izaten da, kanpoko emokadurarekin eta barruko luzituarekin bukatuta. Bere lodiera 15 cm ingurukoa izaten da.

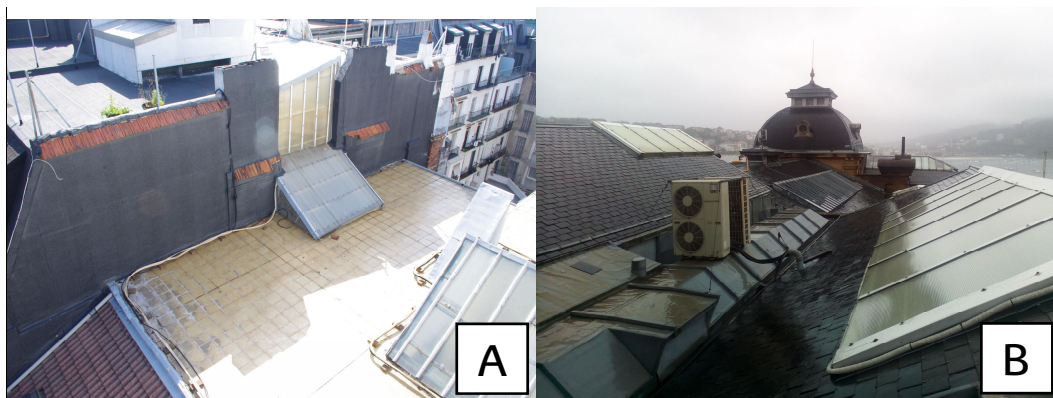
- Estalkia: bere egitura egurrezkoa izaten da birgaitu ez diren eraikinetan. Normalean zeramikazko teilatua izaten dira baina zinkezko eta arbelezko estalkiak ere aurki daitezke. Beste kasu partikularrak jatorrizko arbelezko teiltuak tegola-orriekin aldatu direnak eta xafla asfaltikoak erabiltzen duten estalki lauak dira. Azken hauek batzuetan zeramikazko piezekin bukatuta, 2. 21. Irudia.



2. 19. Irudia- Donostia hiriko horma karakteristiko baten barrualdea eta kanpoaldea.



2. 20. Irudia- Hareharrizko eta kareharrizko horma baten barnealdeko xehetasun konstruktiboa eta kanpoko eta barruko geruzak trabatzeko zeharkatzen duen hareharrizko harlandua.



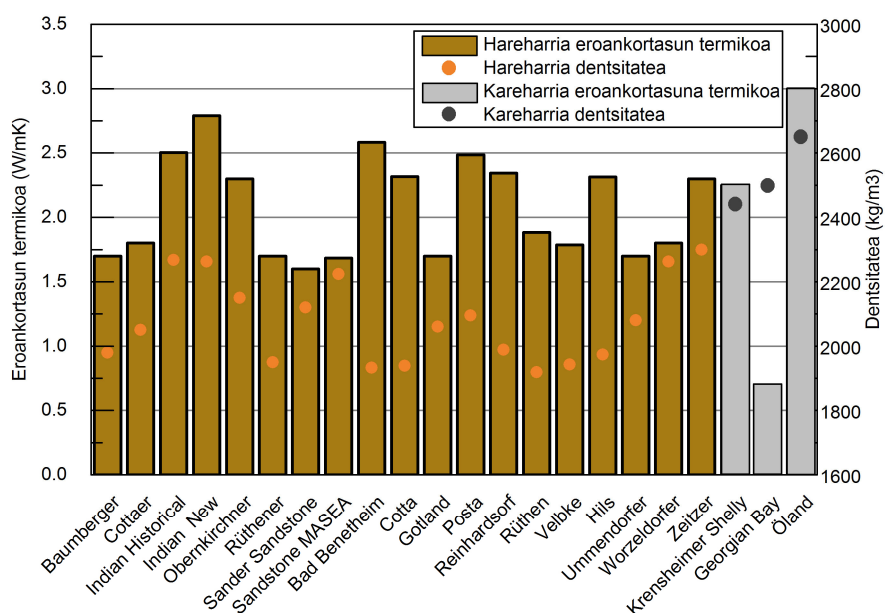
2. 21. Irudia- Azterketa-eremuko estalki adibideak (A: zeramikazko estalki inklinatua teilekin, zeramikazko piezaz estalki lauean eta xafla asfaltikoa, B: arbelezko estalkia zinkeko bukaerekin)

Ikusi ahal izan daiteke bezala, inguratzailetan erabiltzen diren material mota kopurua handia da. Hala ere, hareharriaren eta kareharriaren erabilera nabarmentzen da. Eraikuntzako Kode Teknikoko (EKT) materialen datu basean lehenengo bilaketak egiterakoan kareharri mota ugari eskugarri daudela ikus daiteke, hala ere, hareharriaren kasuan ez da horrela bakarrik erreferentzia-balio bat dagoelako, 2.8.Taula. Literatura azterketa sakonago baten bitartez, 2.22. Irudia, hareharrien propietate termikoak harri motaren arabera oso desberdinak izan daitezkeela argitu daiteke, kareharriarekin gertatzen den bezala.

2.. 8. Taula- Eraikuntzako Kode Teknikoaren elementu konstruktiboen katalogoen harrien ezaugarriak.

Rocas y suelos naturales				
Material	HE			
	ρ kg / m ³	$\lambda^{(1)}$ W / m·K	C_p J / kg·K	μ
Rocas Igneas				
Basalto	2700 ≤ ρ ≤ 3000	3,50	1000	10000
Granito	2500 ≤ ρ ≤ 2700	2,80	1000	10000
Piedra pómez natural	ρ ≤ 400	0,12	1000	6
Roca natural porosa (por ejem. Lava)	ρ ≤ 1600	0,55	1000	15
Traquita, andesita	2000 ≤ ρ ≤ 2700	1,10	1000	15
Rocas o suelos sedimentarios				
Arcilla o limo	1200 ≤ ρ ≤ 1800	1,50	1670-2500	50
Arena y grava	1700 ≤ ρ ≤ 2200	2,00	910-1180	50
Arenisca	2200 ≤ ρ ≤ 2600	3,00		
Asperón	1900 ≤ ρ ≤ 2500	1,80	1000	40
	1300 ≤ ρ ≤ 1900	0,90	1000	20
Caliza, muy dura	2200 ≤ ρ ≤ 2590	2,30	1000	200
Caliza, dura	2000 ≤ ρ ≤ 2190	1,70	1000	150
Caliza, dureza media	1800 ≤ ρ ≤ 1990	1,40	1000	40
Caliza, blanda	1600 ≤ ρ ≤ 1790	1,10	1000	25
Caliza, muy blanda	ρ ≤ 1590	0,85	1000	20
Silex	2600 ≤ ρ ≤ 2800	2,60	1000	10000
Rocas metamórficas				
Gneis, Pórfido	2300 ≤ ρ ≤ 2900	3,50	1000	10000
Esquisto, Pizarra	2000 ≤ ρ ≤ 2800	2,20	1000	800
Mármol	2600 ≤ ρ ≤ 2800	3,50	1000	10000
Tierra vegetal	ρ ≤ 2050	0,52	1840	-

⁽¹⁾ La conductividad térmica incluye el efecto producido por las posibles juntas.



2. 22. Irudia- Fraunhofer IBPren WUFI softwarearen datu-basearen hareharrien eta kareharrien eroankortasun termikoa eta dentsitatea.

Beraz, hormek aztertutako-eremuan ingurutzailer termiko bezala duten garrantziagatik eta konposatzen dituzten harrien ezaugarri termikoei buruzko informazioa faltagatik, eraikin mota hauetan ebaluazio termikoak burutzeko zailtasunak ageri dira.

2.4.2.2. *Helmena eta helburuak*

Atal honen helburu nagusia aztertutako eremuaren hormen karakterizazio termikoa garatzea da. Alde batetik, aztertutako hormak osatzen duten materialen ezaugarri termikoen informazio falta aurkitu egin da. Beste aldetik harrien jatorriaren arabera ezaugarri termikoak erabat desberdin izan daitezke frogatu egin da. Beraz, atal honek eremuko materialen azterketaren bitartez, ingurutzailer termikoen portaera, horma nagusia zehazki, ezagutzea ahalbidetu izango du.

Hortaz, atal honek hurrengo helburuak ezartzen ditu:

2.4.2.1. Helburua Ikerketa eremuko hormak osatzen dituzten harri material nagusien portaera termikoa aztertzea.

2.4.2.2. Helburua Lortutako emaitza esperimentalekin transmisio termiko baliokide bat garatu buru habeek eta leihoek sortutako bi eta hiru dimentsioko zubi termikoen efektua kontuan hartu ahal izateko.

2.4.2.3. Helburua Eraikitako ondarearen hormen bero-transmisio eredu parametrikoki bat garatzea, ezaugarri geometriko eta termikoen arabera.

2.4.2.4. Helburua Barneko isolamendu termikoko esku-hartze bideragarrien bidez hormetan ematen diren galera termikoak murrizteko potentziala zehaztea.

2.4.2.3. Azterketaren metodoa

Atal honek garatutako azterketa esperimentalen eta simulazioan oinarritutako azterketerako erabili diren metodoen deskribapenarekin jarraituko du.

Lehenik eta behin eroankortasun termikoko saiakuntzen deskribapena burutuko da. Horretarako, erabili den metodo bat UNE-EN ISO 8990 [37] oinarritutzen da. Saiakuntza hau, gordetako kutxa beroa deiturikoa, 2.23. Irudiaren bitartez deskribatzen da. Funtzionamenduaren printzipioa aztertu beharreko hormaren bi aldeetan tenperatura desberdintasun egonkorra lortzean oinarritzen da. Hau da, erregimen egonkorra lortzen da eta aztertutako materialaren arabera, bero fluxu zehatz bat zeharkatuko du lagina. Lortutako tenperatura desberdintasunaren, zeharkatutako bero fluxuaren eta laginaren lodieraren arabera, materialaren erresistentzia termikoa eta ondorioz materialaren eroankortasun termikoa hurrengo espresioen bitartez lortu daiteke:

non:

$$R_c = \frac{T_{si} - T_{se}}{\Phi/A} = \frac{\Delta T}{\Phi/A}$$

$$\lambda = \frac{e}{R_c}$$

R_c = laginaren erresistentzia termikoa, $m^2 K/W$

T_{si} = barrualdeko azalerako tenperatura, K

T_{se} = kanpoaldeko azalerako tenperatura, K

ϕ = fluxu termikoa, W.

A = neurketa-azalera da, bero-fluxuaren perpendikularra, m^2 .

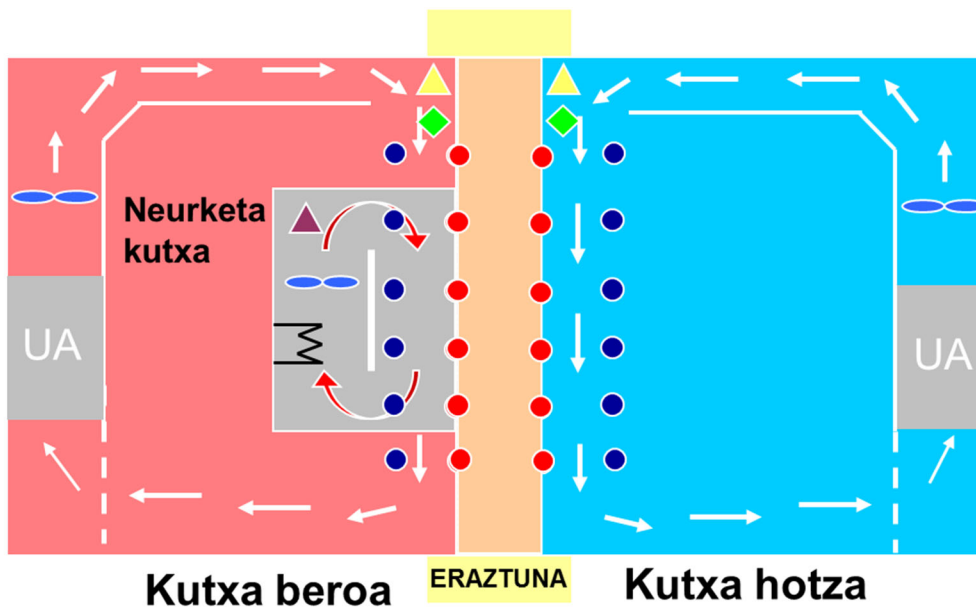
e = laginaren lodiera, m

λ = eroankortasun termikoa, W/m K

Saiakuntza burutzeko kutxa hotza 0° -ko tenperatura ezartzen da eta kutxa beroan eta neurketarako gordetako kutxan 20° -koa. Sortutako bero fluxua neurtzeko, kutxa beroan gordetako beste kutxa bat dago. Honek kutxa beroaren tenperatura berdina du, beraz kutxa honek sortutako beroa lagina zeharkatzen duen beroa da.

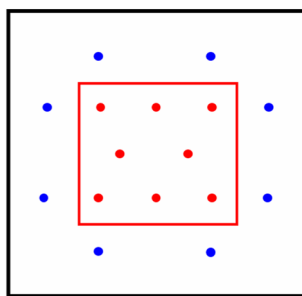
Hormaren alde bakoitzaren tenperaturak T motako (kobre-constantan) termopare zundekin neurtzen dira. Guztira 64 zunda erabiltzen dira: 16 alde beroaren aire tenperaturarako, 16 alde beroaren azal tenperaturarako, 16 alde hotzaren azalerako tenperaturarako eta 16 alde hotzaren aire tenperaturarako. Zunda hauen kokapena bi taldeetan zatitzen dira, alde batetik gordetako kutxaren baldintzak neurtzeko eta bestetik kutxatik kanpoko baldintzak neurtzeko. Hau da, 16 zunda multzo bakoitza 8+8 zundetan banatzen dira, 2.24. Irudia. Honen helburua gordetako kutxa beroaren

eta eraztunaren arteko temperatura desberdintasunik eta horrela bi dimentsioko bero transmisio fenomenoak gertatu ez daitezzen ziurtatzea da. Gainera, kutxak hormaren bi aldeetan hezetasun eta temperatura zunda konbinatuak eta aire abiadura zundak ditu datu gehigarriak lortzeko.



- ▲ Temperatura zunda
- ▲ Hezetasun eta temperatura zunda(2): Egonkortasuna $\pm 0,1$ °C
- ◆ Aire abiadura zunda (2): 0 - 4 m/s
- Hormaren termoparea (16)
- Aireko termoparea (16)

2. 23. Irudia- Gordetako kutxa beroa saiakuntzaren eskema.



2. 24. Irudia- 16 temperatura zundeen banaketa gordetako kutxa beroaren neurketa azaleraren barrualdean eta kanpoaldean.

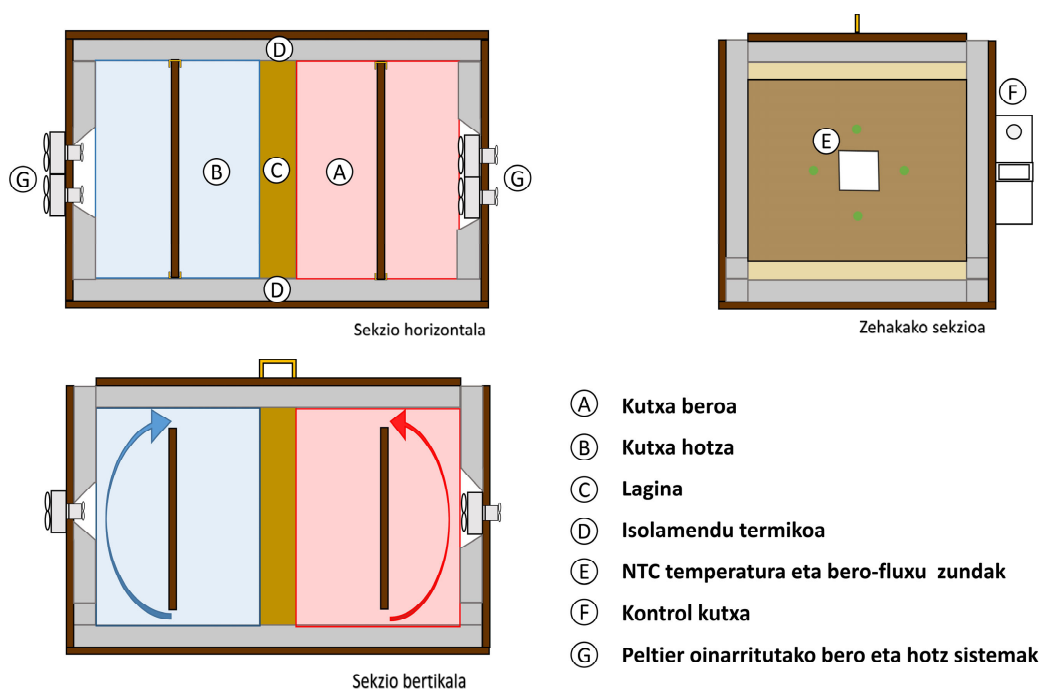
Gordetako kutxa beroan burutu ziren saiakuntzen prozedura 2.25.irudian ikus daiteke. Lehenik eta behin aztertzeko harrien bilketa prozesua Donostiako Udal Materialen biltegian egin zen (1), Ingurumen Sailaren Energia Eraginkortasun Atalaren bidez lortutako baimenaren bidez. Ondoren, materiala Gasteizko Eraikuntza Kalitatearen Kontrolerako Laborategira (EKKL) garraiatu zen eta han hormen laginak eraiki ziren (2). Hormak eraiki direnean, 23°C-ko eta % 50eko baldintza kontrolatuan mantentzen dira ganbera klimatiko baten bitartez laginen hezetasunaren edukia

egonkortzeko eta eraikuntza hezetasuna desagertu dadin (3). Oreka pisua lortzen den unean, laginak saiakuntza ekipamenduan sartzen dira proba egiteko (4). Ekipamenduaren barnean, laginaren bi aldeetan, tenperatura-zundak eta bero-fluximetroak instalatzen dira fluxuaren egonkortasuna egiaztatzeko (5). Azkenik, proba burutu eta gero, sentsoreekin erregistratutako datuak biltzen dira hormaren erresistentzia balioa eta bere eroankortasun termikoa lortzeko.



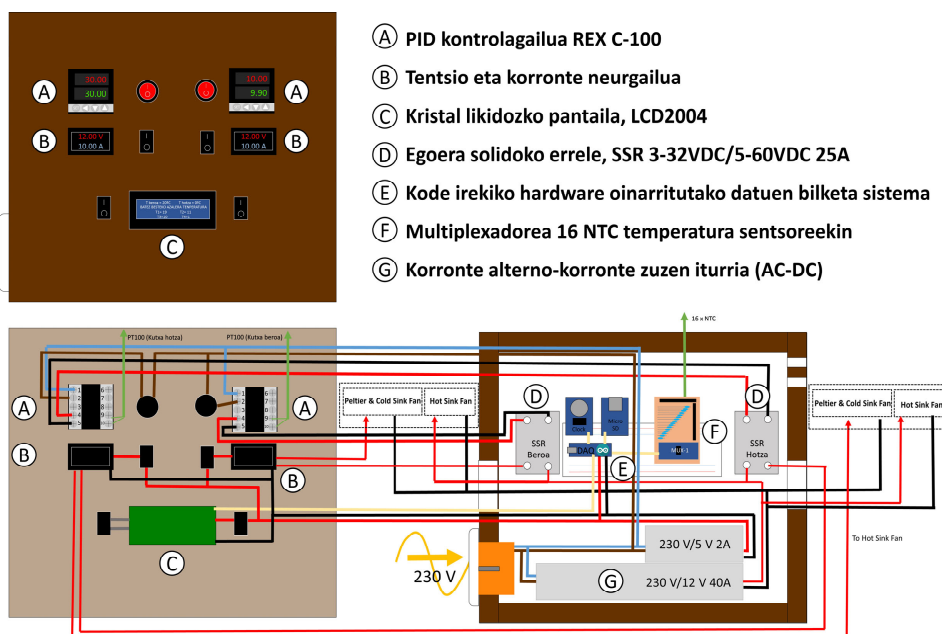
2. 25. Irudia- Gordetako kutxa beroan burutu den prozedura hormen saiakuntzak garatzeko (1- Materialen garraioa Donostiako biltegitik Gasteizko Laborategira, 2- Hormen eraikitzea, 3- Hormen lehortzea, 4- Saiakuntzarako ekipamenduaren irekitzea, 5- Zundak instalakuntza, 6/7- Hormen lodiera, 8- Kareharrizko horma).

Bestalde, gordetako kutxa beroaren metodoarekin lortutako emaitzak egiaztatzeko eta proba-kostu baxuko metodo experimental bat garatzeko, ekipamendu experimental propio bat garatu da, 2.25. Irudia. Eragiketa-printzipioa gordetako kutxa beroaren berdina da, bi tenperatura baldintza ezartzen dira laginaren bi aldeetan. Hala ere, kasu honetan, beroa kalibratutako bero-fluximetro baten bidez neurtzen da.



2. 26. Irudia- Materialen eroankortasun termikoa zehazteko garatutako ekipamenduaren diseinua.

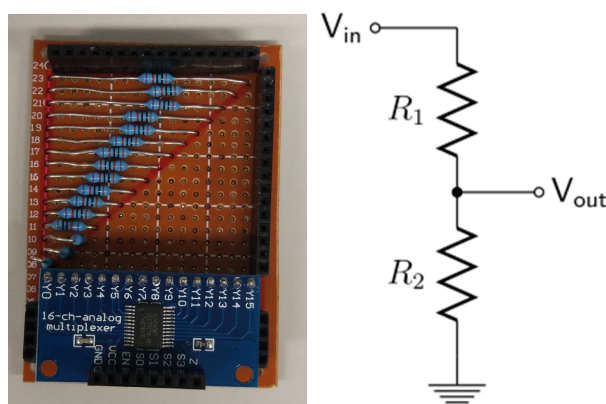
Kontrol kutxaren xehetasunak 2.27.Irudian kontsultatu daitezke. Oro har, kutxa bi funtzioak ditu, alde batetik kutxen baldintza termikoak PID regulazio baten bitartez (A) eta beste aldetik zundekin lortutako temperatura eta bero fluxuaren balioak erregistratu Kode Irekiko garatutako sistemarekin (E).



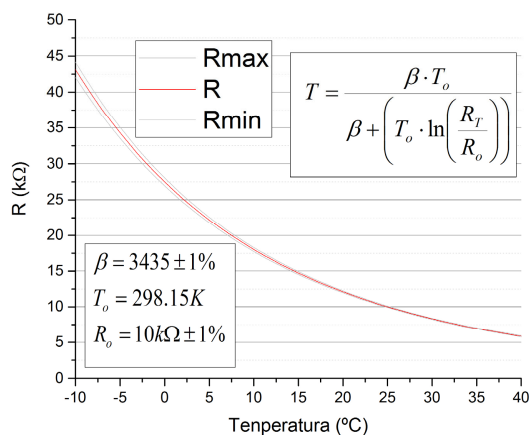
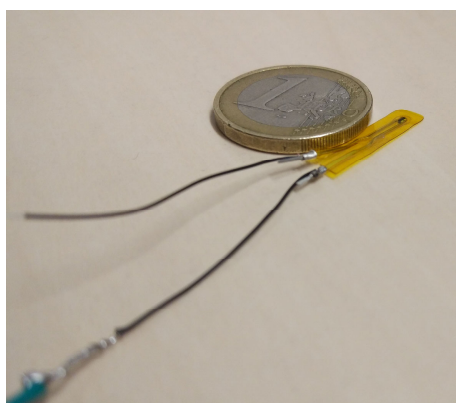
2. 27. Irudia- Kontrol panelaren funtzionamenduaren diagrama

Guztira 16 temperaturako sensore erabili dira eta balio hauek biltzeko CD74HC4067 multiplexadorea (F) erabili behar izan da erabilitako mikrokontrolagailuaren sarrera analogikoak mugatuak direlako. Honek sarrera analogiko bakarrarekin 16 seinale

analogiko arte neurtzea ahalbidetzen du, 2.28. Irudia. Tenperatura sentsoreei dagokionez, MF5B-10K 1% NTC termistoreak erabili dira. Zunda mota hau erabiltzearen arrazoia bere lodiera txikia eta laginarekin kontaktu ona eskaintzen duen posibilitateari da, 2. 29. Irudia. Sentsoreen erresistentzia-balioa aldakorra da neurketa-tenperaturaren arabera, beraz, aldaketaren erantzun-kurba jakiteak tenperatura-balioa lortzea ahalbidetzen du. Horretarako, lehenik eta behin, doitasun handiko erreferentzia erresistentzia batekin (10kOhm + 0.1%) tentsio-zatitzaile bat eraiki behar da NTCren tentsio-jauzia neurtzeko eta hortik erresistentzia balioa lortzeko. Tentsio-zatiketa hau zunda bakoitzerako garatu egin behar da multiplexadoreak sentso bakoitzaren tentsio-jauzia neurtzea lor dezan.



2. 28. Irudia- CD74HC4067 multiplexadorerako eta NTC tenperatura zundeentzako garatutako PCB plaka eta tentsio-zatitzaile eskema.



2. 29. Irudia- Erabilitako NTC tenperatura zunda eta erantzun kurba tenperaturaren arabera.

NTCaren erresistentzia balorea neurtu ondoren Steinhart-Hart espresio sinplifikaturarekin, β parametroaren ekuazio bezala deiturikoa ere, tenperatura lortzen da:



$$T = \frac{\beta \cdot T_o}{\beta + \left(T_o \cdot \ln \left(\frac{R_T}{R_o} \right) \right)}$$

non:

T= neurtutako tenperatura, K.

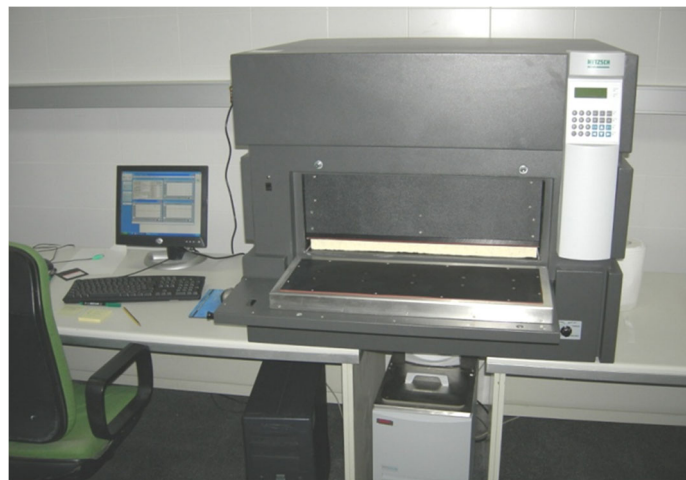
T_o= zundaren erreferentzia tenperatura, K

R_T =neurtutako zundaren erresistentzia balorea, Ohm.

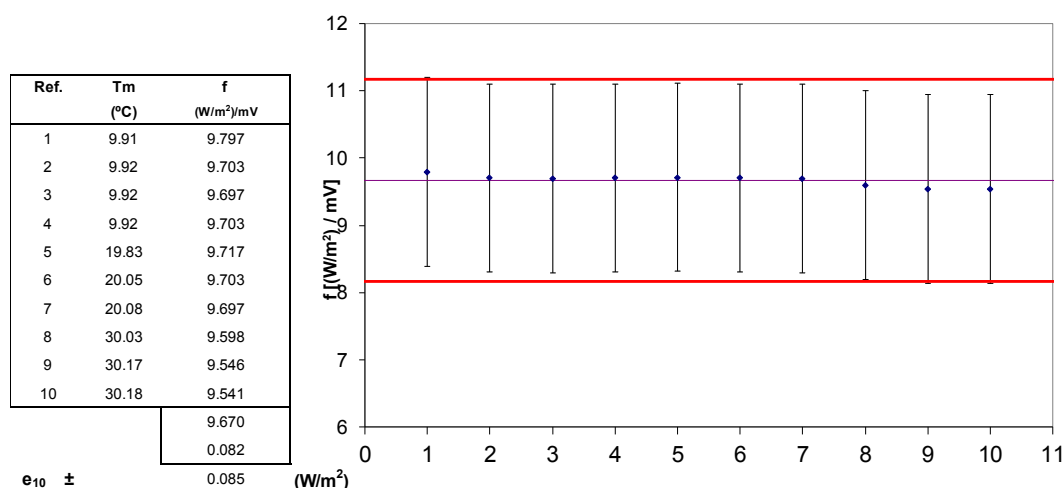
R_o = tentsio-zatitzaile erresistentziaren erreferentzia balorea, Ohm.

β = zundaren koefizientea.

Azkenik, erabilitako bero fluxu sentsorea Ahlborn Typ 118 modeloa da. Bere dimentsioak 120x120x1.5 mm dira fitxa teknikaren arabera neurtutako mV bakoitzako <15 W/m² dagokio %5 doitasunarekin. Zunda bakoitzak mV-W/m² erlazio zehatz bat eskaintzen du, beraz, kalibrazioa funtsezkoa da. Horretarako Gasteizko EKLLan bero fluxu neurgailu ekipamenduekin zunda kalibratu zen, 2.30.irudia. Lortutako emaitzak 2.31.irudian ikus daitezke lortutako batez besteko tenperaturaren arabera. Kalibrazio koefiziente lortu ondoren, posible da lagina zeharkatzen duen bero fluxua neurtzea zundak sortutako tentsio-diferentzia balioak erregistratuz.



2. 30. Irudia- NETZSCH HFM 436 bero fluxu neurgailu ekipamendua bero-fluxu sentsorearen kalibrazioarentzat.

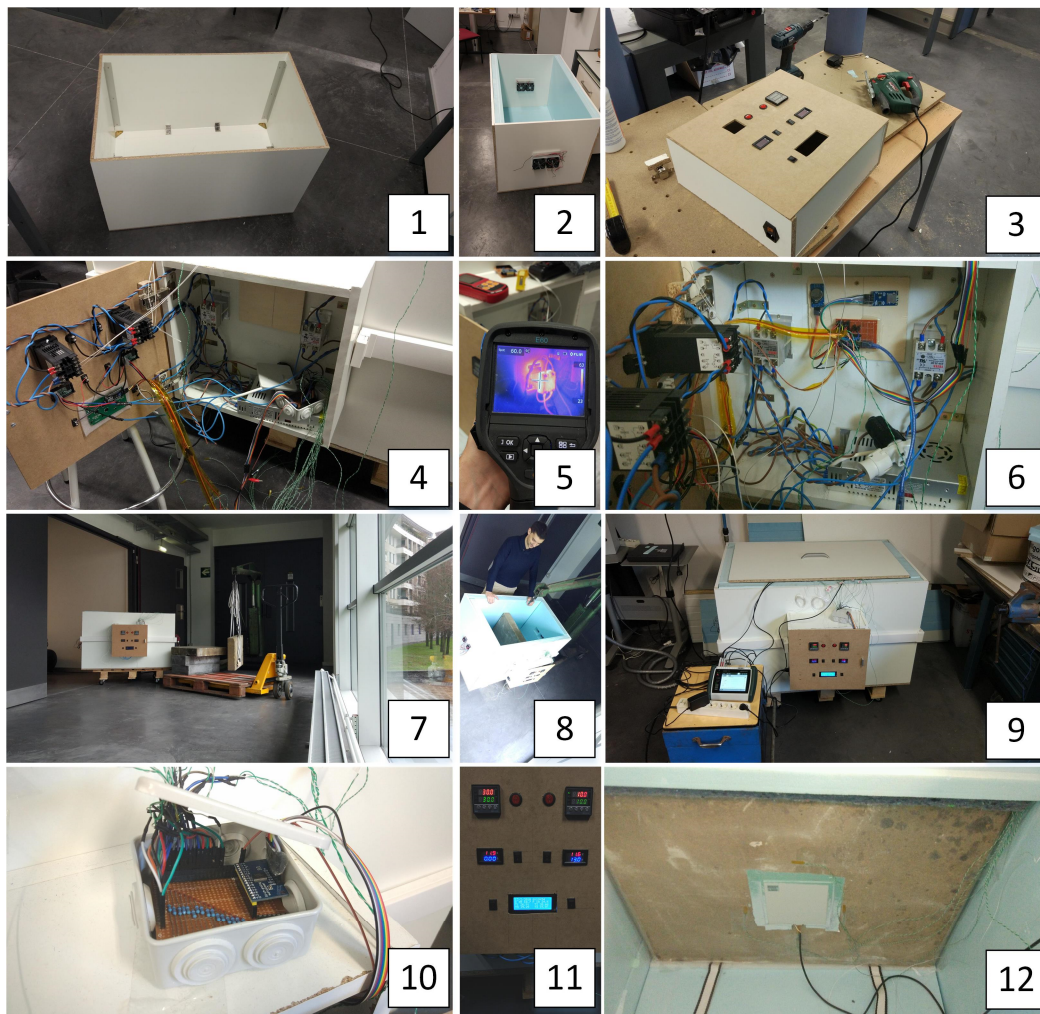


2. 31. Irudia- Bero-fluxu sentsorearen kalibrazio emaitzak temperaturaren arabera.

Garatutako ekipamenduaren eraikin pozedura 2.32.Irudian ikus daiteke. Kutzaren egitura taula aglomeratuekin garatuta (1), kutxaren aurpegi bakoitza 60 mm-ko XPS isolamendu termikoarekin isolatu zen eta bi aldetan Peltier oinarritutako bero eta hotz sistemak instalatu ziren (2). Kontrol kutxan Peltier sistemak kontrolatzeko PID kontrolagailuak eta egoera solidoko erreleak (SSR) instalatu ziren eta, halaber, Kode Irekian oinarritutako datu eskuratzaille sistema (3-6). Garabi-beso bat erabiliz laginak ekipamenduan sartzen dira (7-8). Garatutako ekipamendu osoa (9) alde batetik bestera erraz mugitu daiteke behe aldean instalatuta dituen gurpil batzuen bidez. Garatutako PCBa multiplexadorearekin (10) kontrol kutxaren (11) ondoan dago. Kontrol kutxak PID kontroladoreen bidez kutxaren bi aldeetako temperaturak ezartzeko aukera ematen du eta sentsoreek (12) erregistratutako balioen jarraipena egitea ere.

Atal honen alde experimentalaren deskribapena alde batera utzita, simulazioaren bitartez burutu den azterketarekin jarraituko da. Garatutako saiakuntzekin aztertutako eremuaren harrien ezaugarri termikoak lortuko dira. Hala ere, atal honen sarreran deskribatu den bezala, hormak lodiera eta konposizio oso desberdina izan dezakete. Gainera, inguratzaile termikoen azterketa egin ahal izateko kontuan izan behar dira inguratzaileetan aurki daitezken elementu guztiak, hala nola, leihoak eta egurrezko habeak. Hauek hormetan gertatzen den bero galera areagotu egiten dute, beraz kontuan izatea garrantzi handikoa da.

Simulazio azterketaren bidez eraikitako ondarearen inguratazilearen elementu bereizgarrienaren karakterizazio termikoa lortzea du helburu, hau da horma nagusiak. Emaitzek eraikin mota hauetan aurki daitezkeen edozein kasuistika definitzeko gaitasuna izan behar dute. Beraz, garatu behar den simulazio eredia adierazgarria izan behar da.



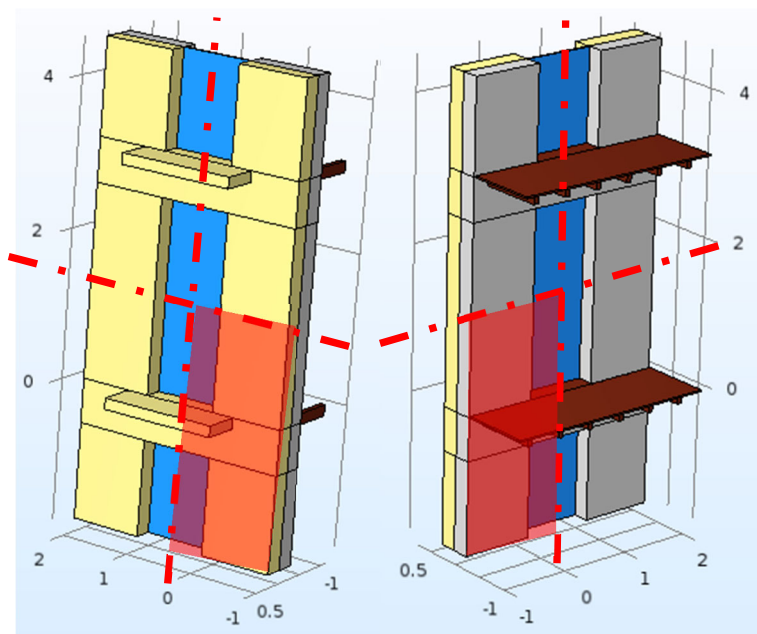
2. 32. Irudia- Eroankortasun termikoa neurtzeko ekipamenduaren eraikuntza prozesua.

Kasu sorta zabala biltzeko beharra dela eta, ez da komeni ezaugarri termiko eta geometria zehatz batean azterketa bideratzea emaitzen helmena asko murriztu baitezake. Horren ondorioz ahalik eta eredu konfiguragarrien baten garapena kasu kopuru zabalarari aurre egiteko aukera emango du. Beraz, simulazio eredu geometria eta ezaugarri parametrikotan oinarritzen bada beharrezko emaitzak lortzea posible izango da.

Simulazio ereduaren eskakizunak kontuan hartuta, Comsol Multiphysics softwarea bero transferentzia ereduarekin erabiltzea egokitzat hartu da. Software honen erabiltzea, 3 dimentsioko eredu konplexuak garatzea ahalbidetzeaz gain, geometria berarekin eredu parametrikokoak garatzeko aukera ematen du. Beste azpimarratu behar den alderdi garrantzitsu bat softwarea eraikineko zubi termikoen UNE-EN ISO 10211 [38] arauaren arabera balidatuta dagoela [39].

Lehenik eta behin, eredu garatzeko azterketaren elementuaren zati adierazgarri bat kontuan hartu behar da. Beste aldetik, hautatutako geometria ahalik eta sinpleena izan behar da simulazio-denbora luzaroan luzatu ez dadin eta eredu oso astuna

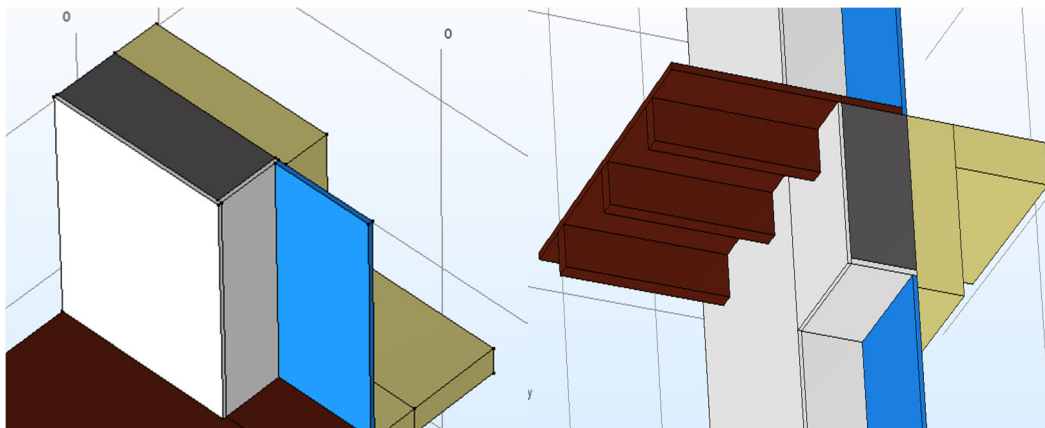
saihestu ahal izateko. 2.33. Irudia horma nagusien 3 dimentsioko irudikapena erakusten du, hau da hormaren zati opakua eta zati erdi-gardena, hala nola balkoia eta barrualdeko egurrezko habe egiturak eta zorua. Simulazio-eremua, itzalpe gorriarekin markatua, simulazioaren elementu geometriko minimoa adierazten du, beraz azterketarako kontuan hartuko den eredia izango da.



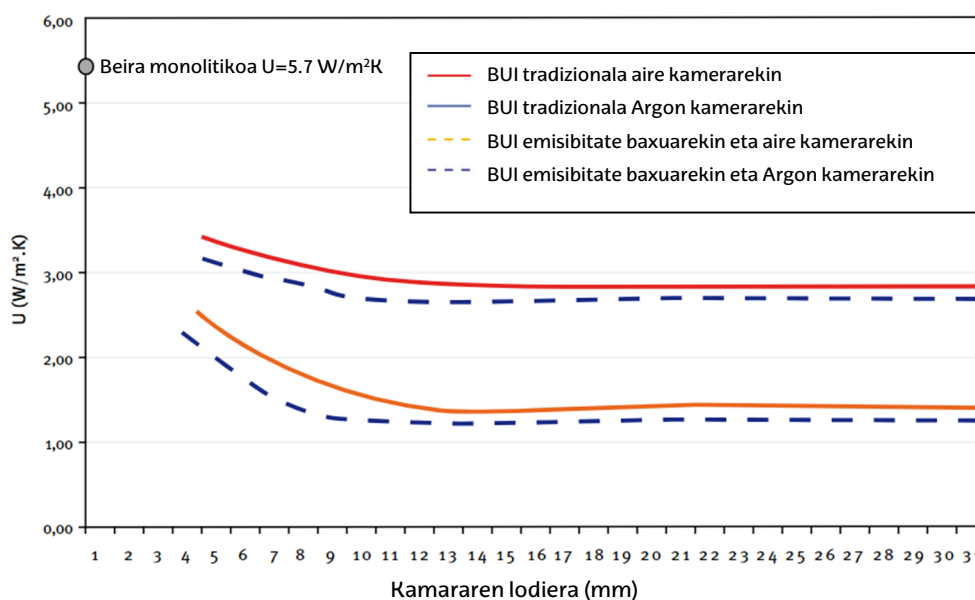
2. 33. Irudia-Simulazio ereduaren zati hautaketa.

2. 34. Irudian xehetasunez ikus daiteke hormen, leihoen eta egurrezko habeen buruen junturak. Kontuan izan behar da ereduaren leihoaren geometria sinplifikatuta dagoela kalkulu-sarearen konplexutasuna handitu ez dadin. Horretarako, leihoa sinplifikatu egin da, garatutako leihoaren geometriaren eroankortasun termikoa baliokidea erabili da, hau da benetako marko eta beira osoan zeharkatuko lukeen beroa kontuan hartuko balitz bezala. Leiho baliokidearen propietate termikoak aukeratzeko oso zabaldua den modelo bat kontuan hartuko da. Alde batetik, erabilitako beirari dagokionez Beira Unitate Isolatzaile (BUI) bat erabiliko da, 16 mm-ko aire kamerarekin eta emisibitate baxuko xflarekin. 2. 35. Irudia ikusten den bezala, lamina baxu emisiboa duten BUIen transmitantzia termikoa asko hobetzea lortzen dute, gainera agerian uzten da kamerak 16 mm lodiera arte bero galerak murrizten dutela, balio hau baino gehiago duten kamerak ez dute ezaugarri termikoak hobetzen. Erabiliko den BUIen transmitantzia termikoa $U_g=1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ izango da. Beste aldetik, leihoaren markoaren materiala egurrezkoa izango da oro har ondarearen eraikinetan material zabalduena delako. Azken urteotan egurrezko leihoak teknikoki asko aurreratu dute egurrezko markoak aire kamerekin adibideetako bat izanik. Hala ere, kasu honetan, erabilera hedatu baten markoa

kontuan hartuko da eta horren transmisio termiko termikoen balioa, BUIen bezala, $U_f=1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ normalean kontuan hartu daiteke [40].



2. 34. Leiho eta hormaren arteko elkargunearen xehetasun konstruktiboa.



2. 35. Irudia-Beiren transmitantzia termikoa (U_g) aire kameraren lodieraren eta betegarriko gas motaren arabera [41].

UNE-EN ISO 10077-1 [42] arauak ezartzen duen bezala, leihoaren transmitantzia termiko osoa (U_w) hurrengo espresioaren bitartez kalkulatu daiteke:

$$U_w = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum l_g \psi_g}{\sum A_g + \sum A_f}$$

non:

U_g = beiraren transmitantzia termikoa, $\text{W/m}^2\text{K}$

U_f = markoaren transmitantzia termikoa, $\text{W/m}^2\text{K}$

A_g = beiraren azalera, m^2

A_f = markoareazalera, m^2

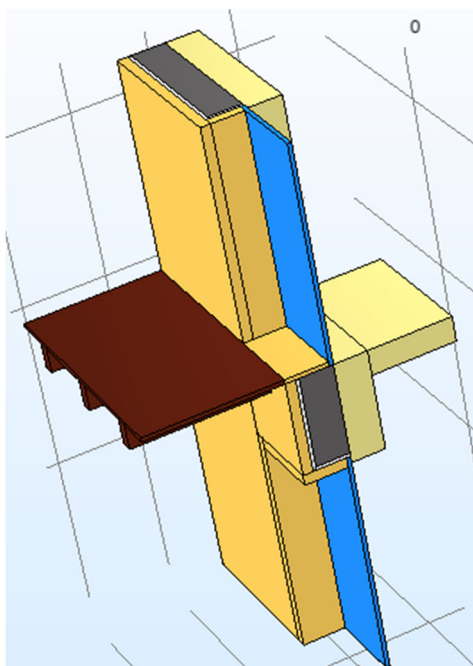
ψ_g = Beira, hutsunea eta markoa eragindako transmitantzia termiko lineala duten efektu termiko konbinatuagatik, W/mK

l_g = transmitantzia termiko linealaren luzeera,
m

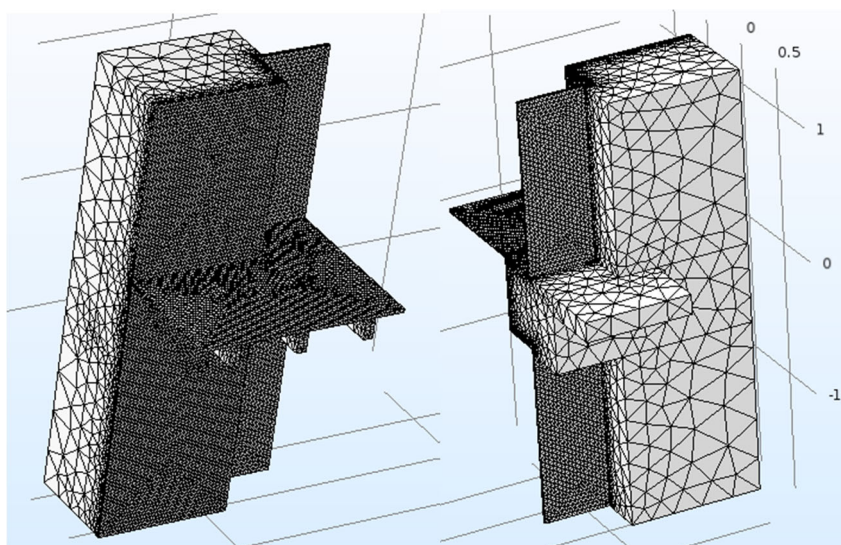
Ikus daitekeen bezala U_w geometriaren arabera da eta kalkulatu nahi den simulazio eredu parametrikoa izango denez, honek ere izan beharko luke. Hala ere, kontuan izan behar da leihoaren modelaketa errealitatearen sinplifikazioa dela. Gainera, kalkulua egiterakoan leiho bakarreko eredu egiten da, beraz honi esker jakin daiteke sortzen dituen bero galerak eta bero eredu guztian sortzen diren galerei leihoaren galerak kentzen zaizkio. Beraz, lortu nahi den helbururako ez da beharrezkoa kalkulo zehatza garatzea. Hori dela eta, beiraren eta markoaren transmitantzia termikoa berdinak direnez, $U_f = U_g = 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$, eta transmitantzia termiko linealaren efektua baztertuz azaldu den arrazoiagatik, simulazio eredurako kontuan hartu beharko den leihoaren transmitantzia termikoa $U_w = 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ izango da. Azkenik, eroankortasun termiko baliokidea kalkulatzeko 24mm-ko lodiera kontuan izango da, hau da BUIaren lodiera. Beraz, azaleko erresistentzia termikoak $0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$ (barrualdekoa) eta 0.04 (kanpoaldekoa) $\text{m}^2\text{K/W}$, leihoaren eroankortasun baliokidea $\lambda_{eq} = 0.0441 \text{ W/mK}$ da.

Beste aldetik, softwarearen kalkulu potentziala aprobetxatuz, Barne Isolamendu Termikoko Sistemen (BITS) bidez lortu daitekeen bero galeren murrizketa neurtzeko eredu gehigarri bat garatuko da. Honek garatutako ereduari, 2. 36. Irudian ikus daitekeen bezala, isolamendu termikoa gehitzen dio barneko hormaren azalean. Aipatzekoa da zubi termikoak murriztu ahal izateko azalera guztia estaltzen dela eta leihoaren ondoan dagoen egurrezko zorua isolamenduarekin ere ordeztu dela, bestela inguratzailearen puntu ahul batean bihurtuko litzateke. Kasu honetarako ere erabilitako materialen geometria eta ezaugarri termikoak parametrikokoak izatea munta handikoa da emaitzek emaitzak ahalik eta orokorgarria izan daitezen eta horrela material desberdinekin garatutako azterketak eredu honekin lortutako emaitzetan oinarritu ahal daitezen.

Azkenik simulazio ereduaren mailatuaren doitzea burutzeko geratzen da. Horretarako maila-moldagarri xehea ezartzen da fisikaren arabera. Ikus daitekeen bezala, 2.26. Irudia, barrualdeko igeltsu akaberan eta leihoaren inguruan maila egokitzen duen xehetasuna askoz handiagoa da. Modu honetan, mailaren elementu gutxieneko tamaina zehaztutako geometriaren gutxieneko tamainari doitu dadin lortzen da.



2. 36. Irudia- Proposatutako birgaitze energetikorako simulazio eredu parametrikoren xehetasuna Barne Isolamendu Termikoko Sistemarekin (BITS).



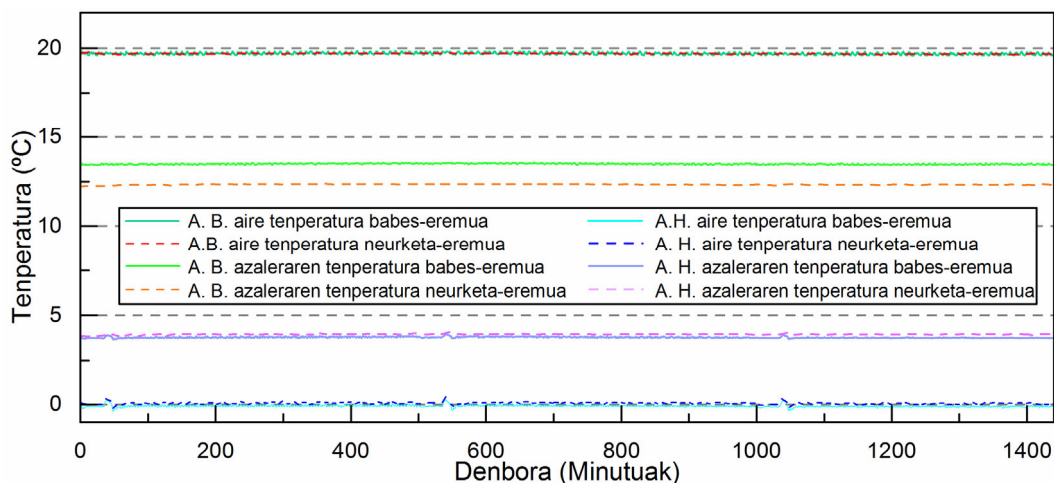
2. 37. Irudia-Simulazio ereduaren maila.

2.4.2.4. **Emaitzak eta eztabaida**

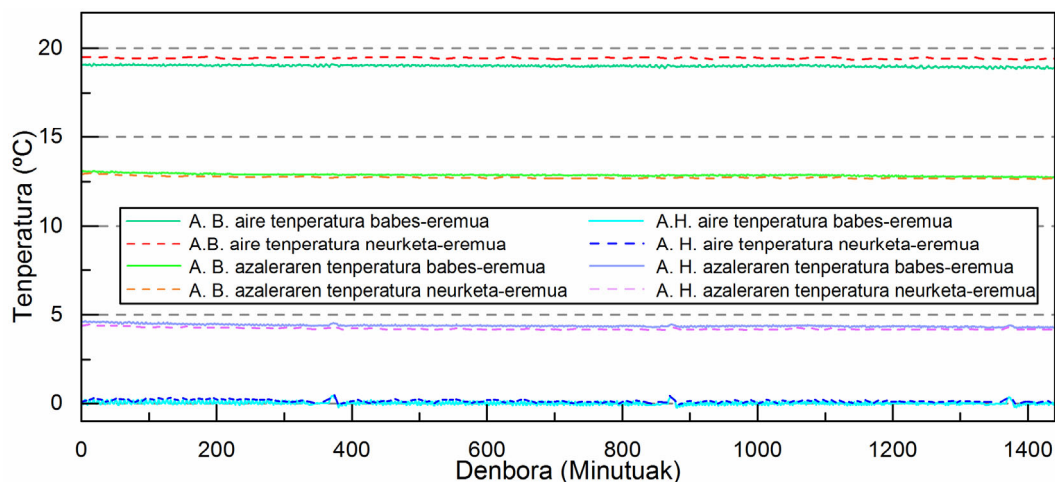
Hurrengo atala harrien saiakuntzen lortutako emaitzak aztertuko ditu eta garatutako ingurutzaila termikoaren bero transmisio ereduaren simulazioarekin bukatuko du. Lehenik eta behin hareharriko eta kareharriko gordetako kutxa bero saiakuntzetan lortutako emaitzak aztertuko dira. Ondoren garapen propio saiakuntzarekin lortutako emaitzekin jarraituko da.

2.38. eta 2.39.Irudiak lortutako tenperatura profilak erakusten dute. Ikusten den bezala alde beroaren kutxa 20°C ezarri ziren, berriz, kutxa hotzean 0°C. Ondorioz eta lagin bakoitzaren erresistentzia termikoaren arabera, azaleko tenperaturak aldatzen

dira, bero aldeko azalekoak jaisten dira eta hotz aldeko azalekoak igotzen dira (aire temperatura erreferentzia hartuta). Temperatura guztietan zehar lortutako egonkortasun termiko handia ikus daiteke. Ez dago aldakuntza nabarmenik, laginetan erregimen termiko iraunkorra lortzen da, beraz, datuen bilketan eragin dezakeen inertzia termikoaren efektua saihestu da ere.

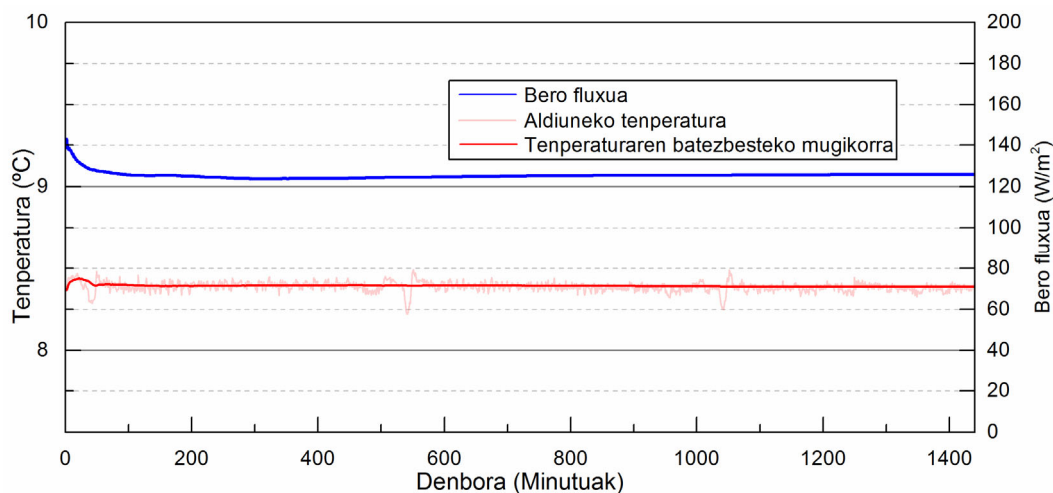


2. 38. Irudia- Gordetako kutxa beroaren saiakuntzan lortutako temperatura profilak hareharrizko horman.

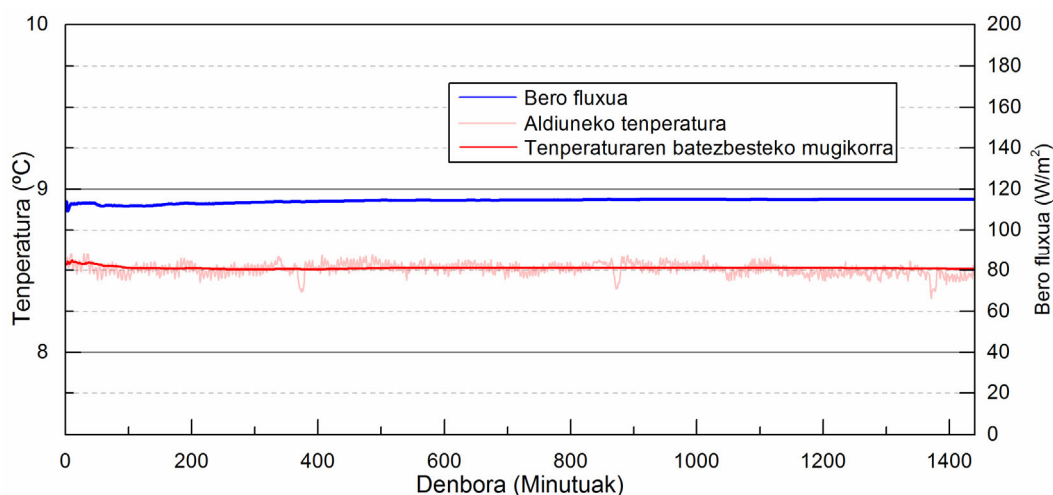


2. 39. Irudia- Gordetako kutxa beroaren saiakuntzan lortutako temperatura profilak kareharrizko horman.

Laginen bi aurpegietan lortutako temperaturen jausia eta gordetako bero kutxa sortutako fluxu termikoaren dentsitateak 2.40. eta 2.41.Irudietan irudikatzen dira. Emaitzak oso antzekoak dira, kareharrizko laginean lortutako temperatura jausia apur bat handiagoa izanez eta hareharrizko kasuan bero fluxua pixka bat handiagoa izanez.

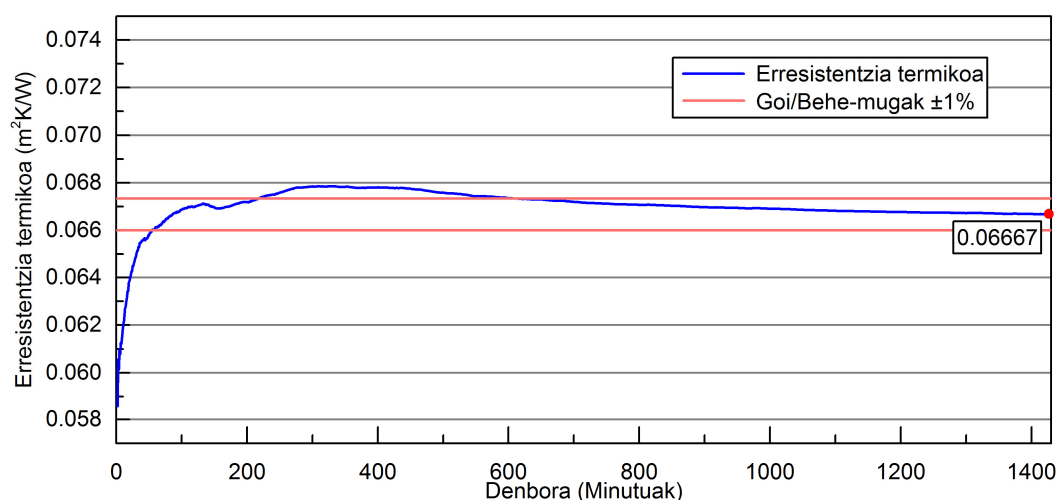


2. 40. Irudia- Gordetako kutxa beroaren saiakuntzan lortutako temperatura jauzia eta bero fluxua hareharrizko horman.

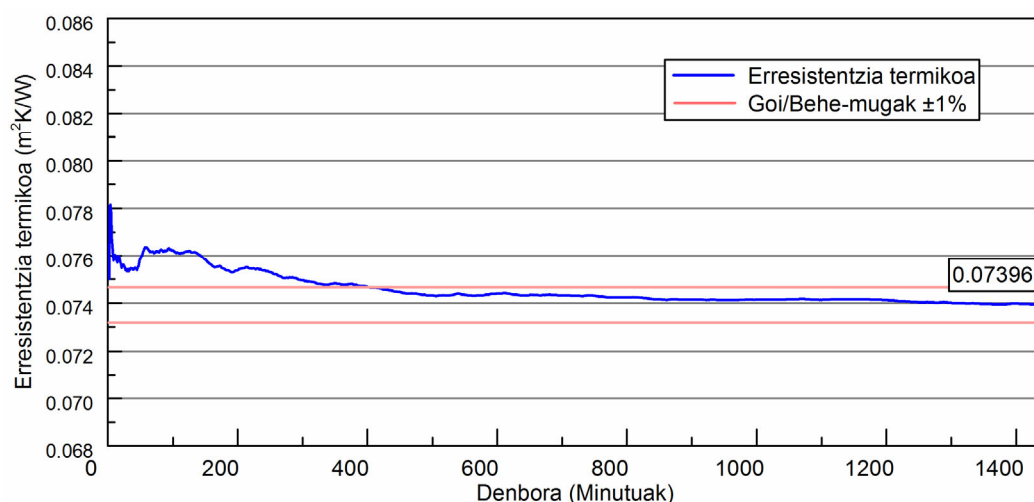


2. 41. Irudia- Gordetako kutxa beroaren saiakuntzan lortutako temperatura jauzia eta bero fluxua kareharrizko horman.

Azkenik, laginen tenperatura jauziak eta zeharkatzen den bero fluxuak ezagututa, laginen erresistentzia termikoa lortu daiteke. Horretarako, gordetako bero kutxaren arauak adierazten duen bezala, saiakuntzaren emaitza lortzeko erresistentzia termikoaren kalkulaturako balioa gutxienez 3 ordutan ezin du %1 baino gehiago aldatu. 2.42. eta 2. 43.Irudiek erresistentzia termikoen emaitzak erakusten dute. Emaitzen beharrezko %1eko egonkortasuna 3 ordutan baino denbora luzeagoz izatea lortu da eta hareharriaren eta kareharriaren hormen kalkulaturako erresistentzia termikoak honako hauek izan dira, $R_{\text{hareharria}} = 0.06667 \text{ m}^2\text{K/W}$ eta $R_{\text{kareharria}} = 0.07396 \text{ m}^2\text{K/W}$.



2. 42. Irudia- Gordetako kutxa beroaren saiakuntzan lortutako erresistentzia termikoa hareharrizko horman.

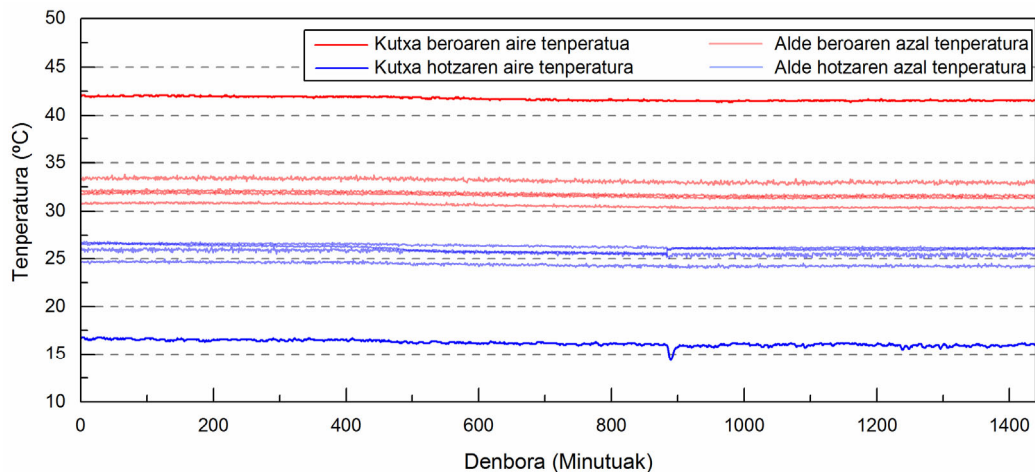


2. 43. Irudia- Gordetako kutxa beroaren saiakuntzan lortutako erresistentzia termikoa kareharrizko horman.

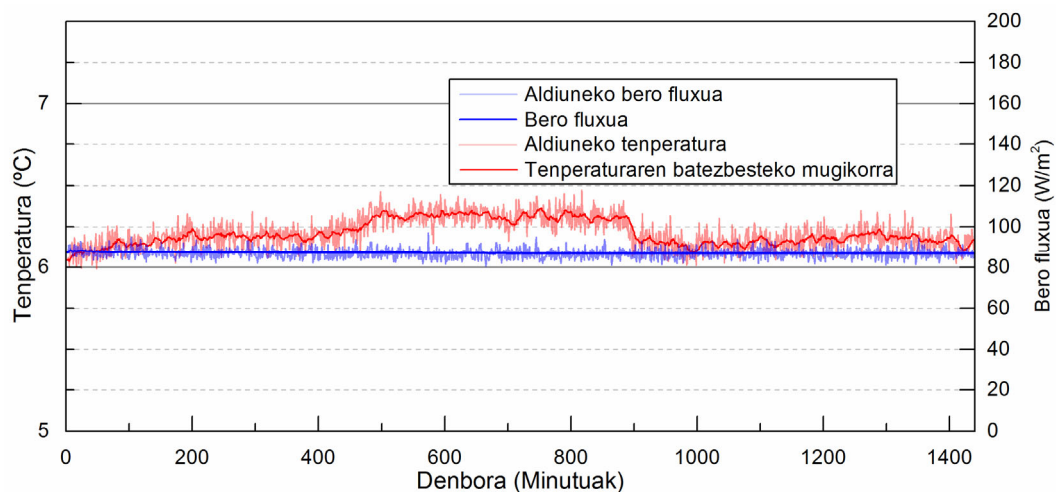
Ondoren, garatutako saiakuntza metodo propioarekin lortutako emaitzekin jarraituko da. Sistema honen helburua gordetako kutxa beroan lortutako emaitzak egiaztatzea eta materialak termikoki karakterizatzeko beharrezkoak diren baldintza teknikoak (laginen kopurua, saiakuntza denbora, laginen eraikuntza...) murrizteko metodologia bat garatzea zen. Horretarako lagin baten saiakuntza besterik beharrezkoa da, beraz kasu honetan hareharrizko lagina erabiltzea hautatu zen.

Arestiko kasuetan bezala, lortutako tenperatura profilak, bero fluxua eta kalkulaturako erresistentzia termikoa 2.44., 2.45. eta 2.46.Iruidietan erakusten dira. Aipatzekoa da kasu honetan bero fluxua neurtzeko metodoak, hau da bero fluxu zundak, sentikortasun handia duela, beraz edozein aldakuntza arina detektatu daiteke 2.45.Irudiak irudikatzen duen neurtutako erdialdeko erregistroekin gertatzen denaren antzera. Hala ere, aldakuntza txiki honek ez du nabarmeneko eraginik emaitzetan, 2.46.Irudia. Garinera, gehitzakoa da kasu honetan, saiakuntza

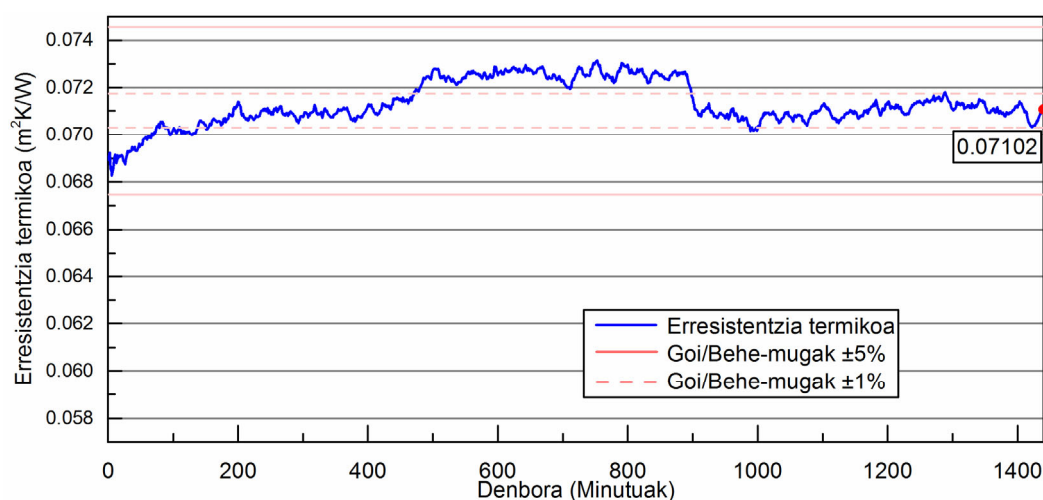
ISO 9869an oinarritzen denez, emaitzen aldakuntzaren balioen mantendu behar den muga gordetako kutxa beroaren saiakuntzaren muga baino handiagoa da. Arauak ezartzen duen bezala, erresistentzia termikoaren balioaren egonkortasuna 24 orduz %5ekoa izatea beharrezkoa da. 2.46. Irudian ikus daitekeen bezala muga hori ez da bakarrik betetzen, gordetako kutxa berorako beharrezkoa den 3 orduko %1eko egonkortasuna ere betetzen da. Beraz, garapen propio saiakuntzarekin lortutako emaitza hareharrizko laginaren kasuan $R_{\text{hareharria}} = 0.07102 \text{ m}^2\text{K/W}$.



2. 44. Irudia- Saiakuntzan lortutako tenperaturen profilak



2. 45. Irudia- Saiakuntzan lortutako batez besteko tenperatura jauzia eta bero fluxua.



2. 46. Irudia- Erresistentzia termikoa saiakuntzan zehar.

ISO 9869 arauaren arabera, saiakuntza metodo honekin lortutako emaitzen ziurgabetasun hurrengo faktoreen arabera da:

- Bero fluxuaren kalibrazioaren zehaztasuna. Ohiko errorea, ondo kalibratuta, %5ekoa da.
- Laginaren azaleraren eta sentsoreen arteko kontaktua. Bariazio hau %5 ingurukoa izan ohi da eta bero-fluxu zunda kopuru erabiltzen badira bariazio hau murriztu daiteke.
- Bero-fluxuen zundaren presentziaren ondorioz sortutako temperatura-profilaren aldaketan akatsak. Hondar-errorea %3koa da.
- Temperaturen eta bero fluxuen sortutako aldakuntzak zehaztasunaren balioan efektua dute. Errore hauek murriztu daitezke saiakuntzaren denbora epea luzaroan egiten ba da. Hala ere, efektu honen ondorioz sortutako errore handiena % 10ekoa da.

Beraz, saiakuntza metodo honen ziurgabetasuna $e = \sqrt{5^2 + 5^2 + 3^2 + 10^2} = 13\%$ da.

Emaitza orokorrak aztertuz, Aipatzekoa da eta espero zen bezala, gordetako kutxa beroak egonkortasun handiagoa eskaintzen du saiakuntzaren baldintza termikoetan garatutako saiakuntza propioarekin alderatuta. Emaitzen desbiderapen estandarra (σ) oso txikia da neurtutako parametro guztietan, eta horren ondorioz emaitza finalaren ziurgabetasun ere txikiagoa da, %5ekoa izanez. Beste aldetik, garatutako saiakuntza metodoarekin lortutako baldintza termiko ere egonkortasuna izan arren, lortutako baloreak pixka bat altuagoak dira. Horren ondorioz, kasu honetan emaitza finalaren ziurgabetasuna %13a da.

2.9.Taula, lortutako materialen eroankortasun termikoa ikus daiteke. Alde batetik, gordetako kutxa beroko emaitzei dagokionez eta arauak eskaintzen dituenekin alderatuta, 2.8.Taula, hareharriaren eroankortasunaren aldea nabaria da. Arauak



eskaintzen duen balioa $\lambda = 3 \text{ W/mK}$ eta gordetako kutxa beroaren saiakuntzaren balio $\lambda = 1.50 \text{ W/mK}$, beraz bata eta bestearen aldea %50 da. Garapen propioko saiakuntzarekin lortutako emaitza finala $\lambda = 1.41 \text{ W/mK}$ da, beraz saiakuntzaren ziurgabetasuna kontuan izanda ($\pm 0.162 \text{ W/mK}$) gordetako kutxa beroarekin lortutako emaitzarekin bat dator. Azkenik, kareharriko emaitza $\lambda = 1.62 \text{ W/mK}$ izan da, beraz arauaren "kareharri gogorra"-ren eroankortasun termiko $\lambda = 1.70 \text{ W/mK}$ balioaren antezkoa da.

Aipatzekoa da eta espero zen bezala, gordetako kutxa beroak egonkortasun handiagoa eskaintzen du saiakuntzaren baldintza termikoetan garatutako saiakuntza propioarekin alderatuta. Emaitzen desbiderapen estandarra (σ) oso txikia da neurtutako parametro guztietan, eta horren ondorioz emaitza finalaren ziurgabetasun ere txikiagoa da, %5ekoa izanez. Beste aldetik, garatutako saiakuntza metodoarekin lortutako baldintza termiko ere egonkortasuna izan arren, lortutako baloreak pixka bat altuagoak dira. Horren ondorioz, kasu honetan emaitza finalaren ziurgabetasuna %13a da.

2.9. Taula- Hareharrizko eta kareharrizko eroankortasun termikoen emaitzan saiakuntza metodoaren arabera.

Datos	GORDETAKO KUTXA BEROA				GARAPEN PROPIOKO SAIKUNTZA			
	KAREHARRIA		HAREHARRIA		KAREHARRIA		HAREHARRIA	
	Balioa	σ	Balioa	σ	Balioa	σ	Balioa	σ
Alde hotzaren temperaturak								
θ_{ce} (airea) °C	0.13	± 0.08	0.06	± 0.07	16.20	± 0.29		
$\theta_{se,sur}$ (horma) °C	4.43	± 0.06	3.96	± 0.03	25.57	± 0.21		
Alde beroaren temperaturak								
θ_{ci} (airea) °C	19.46	± 0.04	19.70	± 0.03	41.73	± 0.20		
$\theta_{si,sur}$ (horma) °C	12.74	± 0.06	12.34	± 0.03	31.78	± 0.20		
ΔT_m (azaleko tenperatura jauzia) °C	8.51	± 0.01	8.39	± 0.01	6.17	± 0.07		
q_{sp} (laginaren fluxu termikoaren dentsitatea) W/m^2	115.09	± 0.96	125.79	± 1.58	86.85	± 0.30		
R_m (neurtuta) $(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$	0.074	± 0.001	0.067	± 0.001	0.071	± 0.001		
ΔR_m (neurketaren ziurgabetasuna) $(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$		± 0.004		± 0.003		± 0.009		
e (laginaren lodiera) m	0.12		0.10		0.10			
λ W/mK	1.62	0.083	1.50	± 0.071	1.41	± 0.162		

Emaitza esperimentalak lortu ondoren simulazio azterketarekin jarraitzen da. Lehenik eta behin lortutako materialen eroankortasun termikoak baliatuz lehengo azterketa ereduaren lodieraren arabera (kanpoaldeko harlandua eta barruko harlangaitza) izango da. Horretarako 2.10.Taulan erakusten diren parametroen ezaugarriekin burutuko da simulazioa.

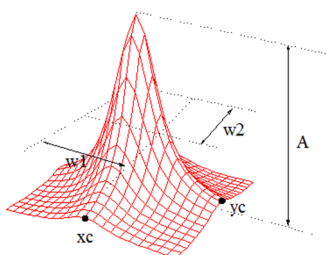
Simulazio eredu honetan, guztira 16 kasu kalkulatu dira, 2.48.Irudia. Aurreikusten den bezala, transmisio termiko altuena horma lodiera txikiagoekin lortzen da eta galera termiko txikiak lodiagoak diren kasuetan gertatzen dira. Balio minimo eta maximoen arteko desberdintasuna, $U=1.98 \text{ W/m}^2\text{K}$ eta $U=2.48 \text{ W/m}^2\text{K}$, ez da oso nabarmeneko berez hormaren materialak ez dutelako erresistentzia termiko handirik. Beraz, horma hauek gaitasun isolatzaile gaitasun falta dute.

2.10. Taula-Simulazio parametrikoaren eredurako kontuan izan diren parametroen ezaugarriak lortutako harrien eroankortasun termikoen emaitzen arabera aztertu ahal izateko.

Parametro	Balio-tartea	Urrats - balioa	Kasu kopurua	Kasu guztien kopurua
Kanpoaldeko harladuzko hormaren lodiera (m)	0.2-0.35	0.05	4	16
Barrualdeko harlangaitzeko hormaren lodiera (m)	0.2-0.35	0.05	4	

Emaitza hauen bitartez, aztertutako eremuaren edozein lodierako hormak aztertu nahian, grafiko honekin transmisio termiko balioak eskuratzea ahalbidetzen da. Hala ere, zuzenean iruditik zaila da balio zehatz bat lortzea, beraz lortutako emaitzen doikuntza tekniken bidez modu zehatzago batean hormak kuantifikatu ahal izateko metodo bat eskaintzen da.

Karratu txiki bidezko doikuntza-metodoaren bitartez, lortutako emaitzak funtzio batekin doitu daitezke. Parametro kopuru gutxi duten funtzioak erabiltzeko beharra kontuan hartuta, Lorentzian funtzioa zehaztasunez doitzen da lortutako emaitzekin.

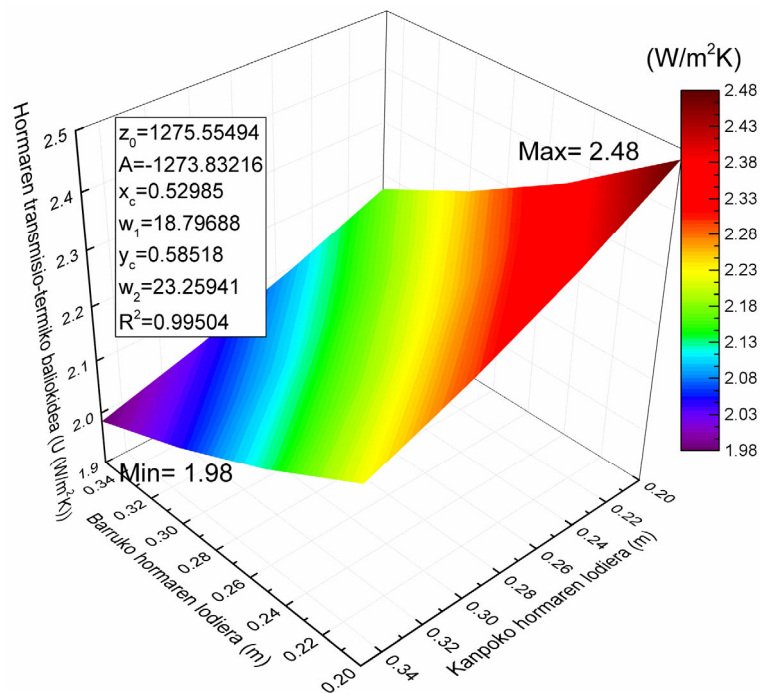


$$z = z_0 + \frac{A}{\left[1 + \left(\frac{x - x_c}{w_1}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{y - y_c}{w_2}\right)^2\right]}$$

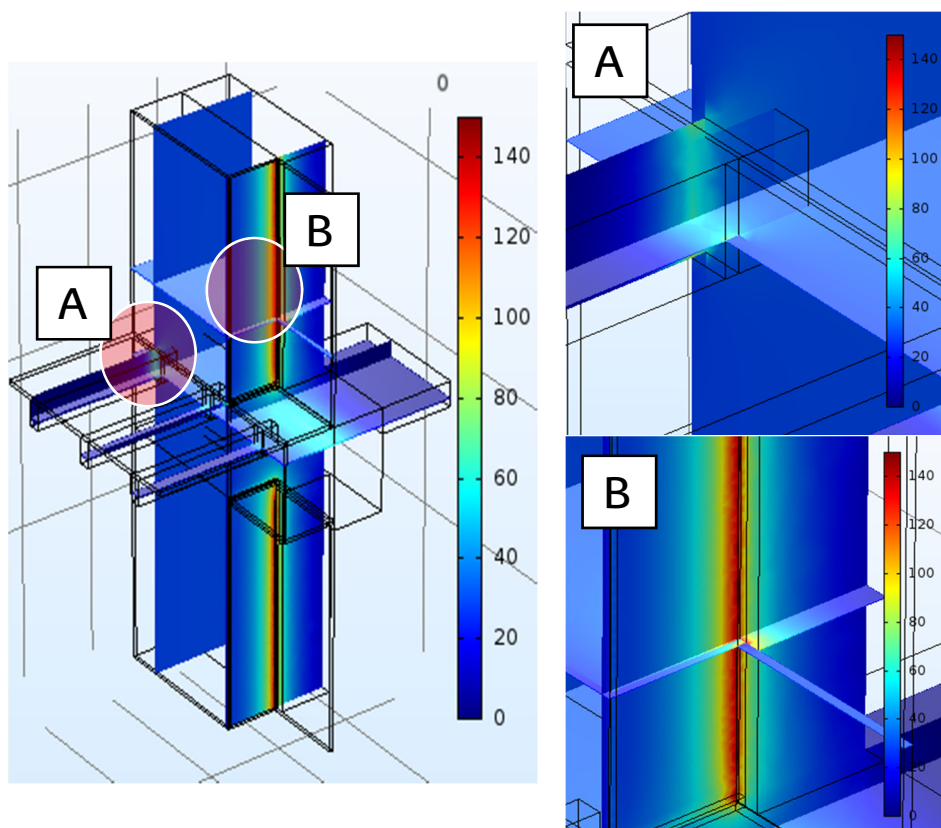
2. 47. Irudia- Karratu txiki bidezko doikuntzarako Lorentzian funtzioa.

2.48. Irudian ikusten den bezala, doiketa funtzioaren parametroen balioa erakusten da, hala nola doikuntzaren R² balioa. Aipatu den bezala funtzio honen bidez, lortutako emaitzen doikuntza oso egokia lortzen da, R²=0.99496 balioa lortuz.

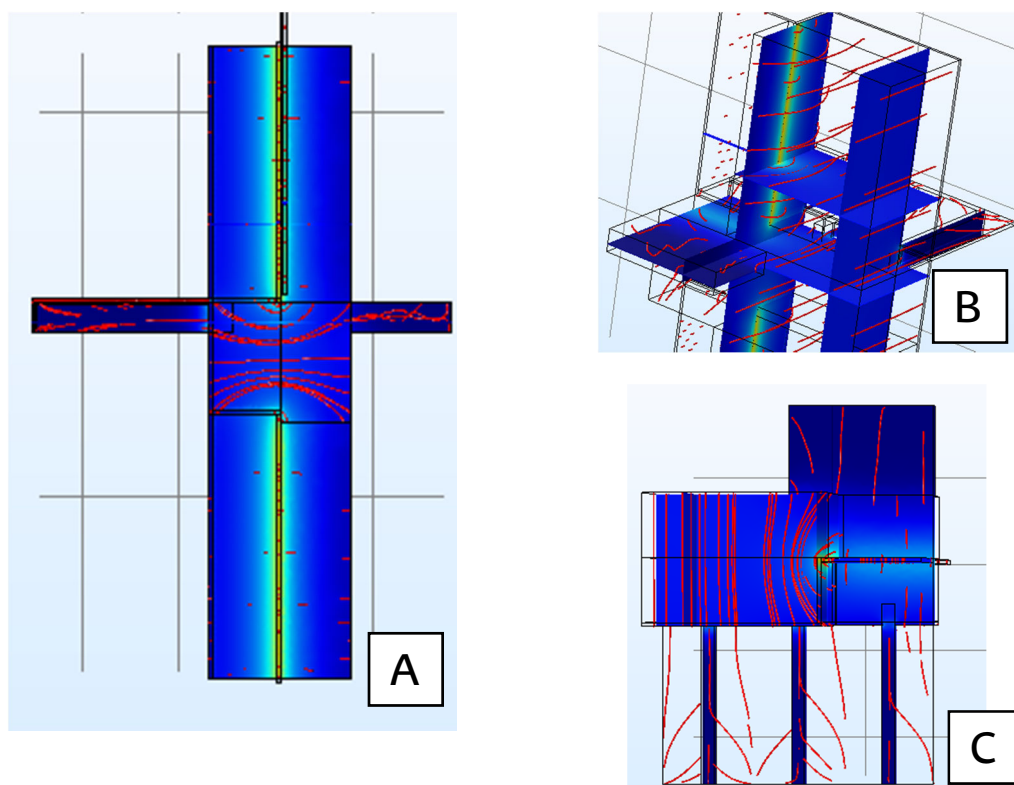
Emaitza grafikoei dagokionez eta 0.70 metro lodierako kasua adibide bezala kontuan hartuta, zubi termikoen duten efektua inguratzailearen bero galeretan 2. 49. Irudian ikus daitezke. Irudian honetan, garatutako ebaketa bertikala eta horizontalekin, bereiz daitezke egur habe buruetan (A) eta leiho markoan (B) gertatzen den bero fluxuaren igoera. 2.50. Irudiak garbiago erakusten du fluxu termikoak hartzen duen ibilbidea, hau da zona hauetan bi eta hiru dimentsioko fluxua gertatzen da eta horren ondorioz galera termikoak areagotzen dira.



2. 48. Irudia- Hormaren transmisio-termiko baliokidea kanpoko eta barruko hormaren lodieraren arabera (Hareharriaren eta kareharriaren eroankortasun termikoak $\lambda=1.50$ eta $\lambda=1.62$ W/mK izanda).

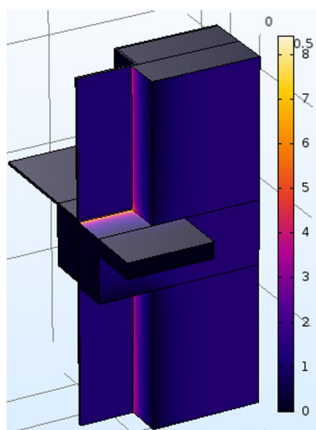


2. 49. Irudia- Fluxu termikoa (W/m^2) zubi termikoetan 0.70 metro lodiko hormaren kasuan (A: egurrezko habeen buruak B: leihoaren eta hormaren arteko elkargunea).



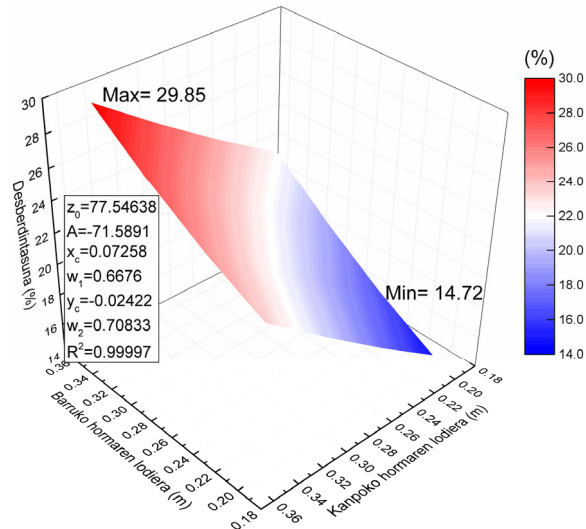
2. 50. Irudia- Bero-fluxuaren ibilbidea simulazio ereduaren zubi termikoetan (A: Leihoaren kargahabea, B:, Leihoaren markoaren perimetroan eta horman gertatzen den dimentsio bakarreko fluxu termikoa C: Leihoaren markoaren perimetroan)

Zubi termiko hauen efektuaren emaitza 2.51.irudian ikus daiteke inguratzaile termikoaren azaleraren transmitantzia termikoen desberdintasunen bitartez. Kasu honetan ere, leihoaren inguruan gertatzen den bero fluxuaren areagotzea transmitantzia termikoaren balio altuagoan bihurtzen da, hau da zubi termikoaren efektua kontuan hartzen da. Beste aldetik, egurrezko habeen eragina ez du hainbeste eraginik. Gertaera termiko honen kuantifikazioa, arestian kalkulaturako transmitantzia termiko baliokidearekin lortzen da, hau da zubi termikoetatik eta hormatik zeharkatzen den beroa kontuan hartzen duen parametroa.



2. 51. Irudia-Inguratzaile termikoaren transmitantzia termikoa (W/m^2K) puntu bakoitzatik zeharkatzen den fluxu termikoaren arabera.

Azkenik, transmisio termiko baliokidea dimentsio bakarreko transmisio termikoarekin alderatzen bada, ikus daiteke zubi termikoek sortzen duten parametroaren handitzea %14.72tik %29.85era dela, 2.52.Irudia.



2. 52. Irudia- Transimio termiko ehuneko handitzea dimentsio bakarreko transmisio termikoarekin alderatuta.

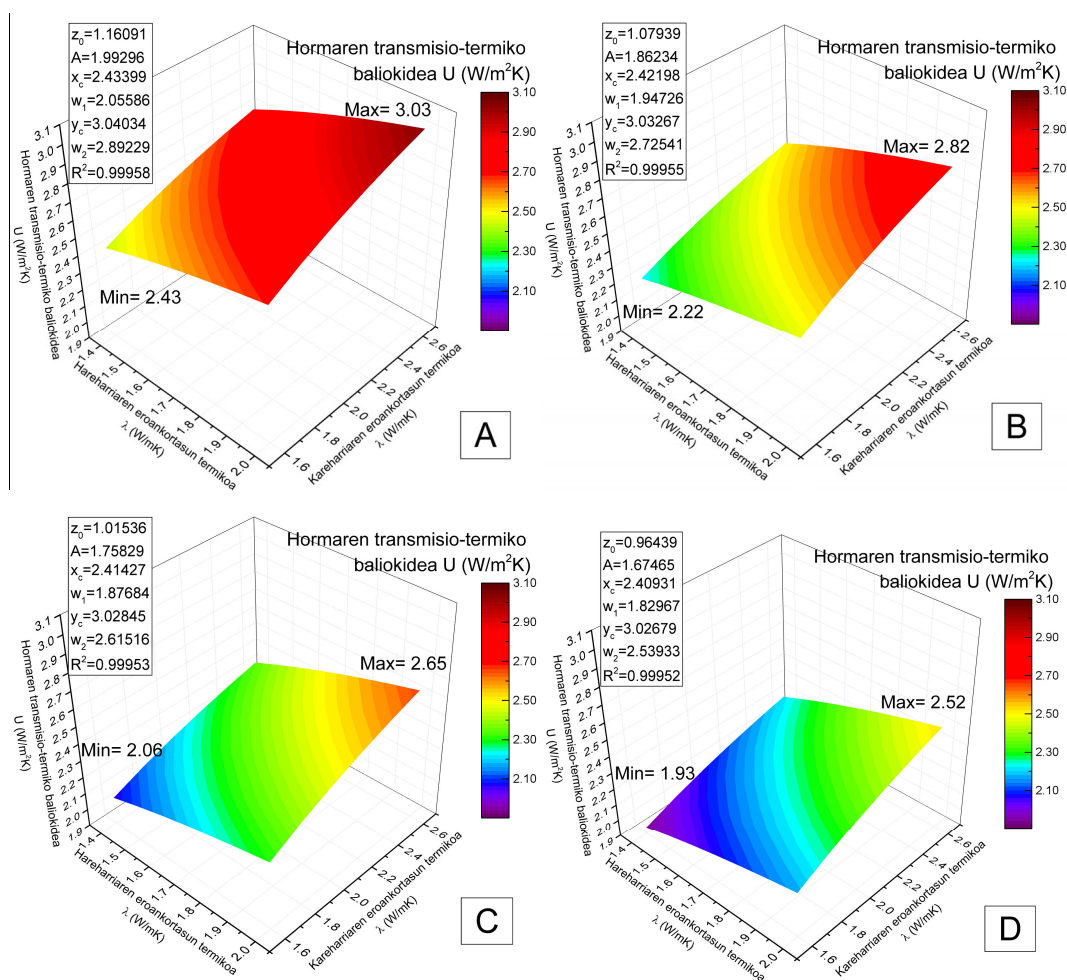
Aurreko simulazioaren printzipioa jarraituz, hormen loditasun eta materialen eroankortasun termikoen arabera ereduak garatu dira ere. Hau da, aurreko eredu parametrikoa saiakuntzetatik lortutako eroankortasun termikoetara mugatuta zegoen. Beraz, hurrengo simulazio parametrikoekin ingurutzailer mota honen karakterizazio termikoaren helmena hedatzen da.

Lehenik eta behin, 2.11.Taulan ikus daitekeenez, simulatutako kasuen bolumena nabarmen handitu da parametro kopurua ere handitu duelako, guztira 672 simulatutako kasuak izanez. Alde batetik, parametroen tartekak emaitzak adierazgarriak izan daitezzen erabaki da. Beste aldetik, urrats balioen aukeraketa, aldakuntzak leialtasunez adierazi ahal izateko eta aldi berean simulatutako kasuen kopurua asko ez handitzeko egin da. Prozedura hau ez jarraitzekotan, simulazioak behar duen kalkulu denbora eta sortutako datuen bolumena areagotu egingo litzateke.

2.11. Taula-Simulazio parametrikoren eredurako kontuan izan diren parametroen ezaugarriak hormen lodieraren arabera aztertu ahal izateko.

Parametro	Balio-tartea	Urrats - balioa	Kasu kopurua	Kasu guztien kopurua
Hareaharriaren eroankortasun termikoa (W/mK)	1.4-2	0.1	7	672
Kareharriaren eroankortasun termikoa (W/mK)	1.6-2.6	0.2	6	
Barruko hormaren lodiera (m)	0.2-0.35	0.05	4	
Kanpoko hormaren lodiera (m)	0.2-0.35	0.05	4	

2.53. Irudiak simulazio parametrikoen emaitza sorta bat erakusten da. Hau da, bakarrik kanpoaldeko harlanduzko horma lodiera eta barrualdeko harlangaitz horma lodiera berdinak dituzten kasuak erakusten dira. Kasu hauetan ere, emaitzak doitzen duten funtzioaren parametroak gehitzen dira. Emaitza hauei dagokionez, emaitza talde bakoitzarako balio minimo eta maximoen arteko desberdintasuna oso nabarmenekoa ez izan arren, A irudiaren emaitza maximoaren eta D irudiaren emaitza minimoaren arteko desberdintasuna esanguratsuagoa da. Emaitza hauek, simulazio kanpaina parametrikoren balio maximoa eta minimoa dira eta %57 diferentzia dago beraien artean. Talde bakoitzeko desberdintasuna dagokionez hurrengo balioak hartzen dute: A taldean %24, B taldean %27, C taldean %28 eta D taldean %30. Aipatu bezala, talde bakoitzaren desberdintasunak ez dira hain nabarmenekoak.



2. 53. Irudia-Hormaren transmisio-termiko baliokidea hareharriaren eta kareharriaren eroankortasun termikoaren eta horma lodieraren arabera (A: 0.4m B: 0.5m, C: 0.6m, D: 0.7m).

Simulazioen azken fasea Barne Isolamendu Termiko Sistemek (BITS) bero-galerak murrizteko duten eraginaren azterketan oinarritzen da. Kasu honetarako lodiera meheena duen horma aztertuko da kasu kaltegarriena kontuan hartu ahal izateko.

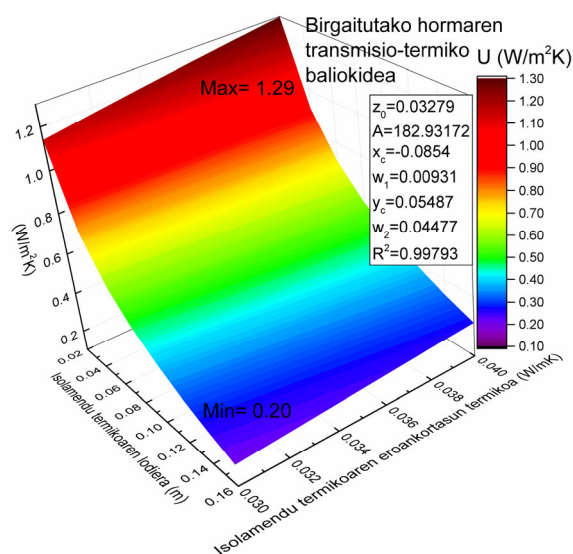
Erabilitako parametroak, 2.12.Taula, eraikuntzako material isolatzaileetan ohikoak izaten diren eroankortasun termiko desberdinak kontuan hartzeko aukera ematen dute hormaren kalkulu termikoak burutzeko. BITSetan 40 edo 60 milimetro lodierako isolamenduak erabiltzeko ohikoenak, eraikinaren azalera erabilgarri gutxiago galtzen baitute, izan arren, lodiera gehiagoko aukerak ere kontuan hartuko dira kasu berezien erantzun termikoa ere ezagutzeko.

Guztira 48 simulazio kasu burutu dira. Emaitzak eta doitze planoaren parametroak 2. 54. Irudian aurkezten dira. Nabari da BITSrekin lortzen den bero galeren murrizketa. Zehazki, jatorrizko emaitzekin alderatuta, (A) 2. 53. Irudiaren harearrirako $\lambda=1.50$ W/mK eta kareharrirako $\lambda=1.62$ W/mK balioak dituen erreferentzia, hau da $U=2.48$ W/m²K-ko kasua, birgaitza energetikoaren bitartez horman lortu daitekeen bero galera murrizketa %48 tik %92 bitartekoa da.

2.12.Taula- Simulazio parametrikoaren eredurako kontuan izan diren parametroen ezaugarriak hormen birgaitza energetikoen efektua aztertu ahal izateko.

Parametro	Balio-tartea	Urrats - balioa	Kasu kopurua	Kasu guztien kopurua
Isolamendu termikoaren eroankortasun termikoa (W/mK)	0.03-0.04	0.02	6	48
Isolamendu termikoaren lodiera (m)	0.02-0.16	0.02	8	

Hala ere, birgaitze energetiko orokor bat kontuan hartzen bada, hau da aipatutako 40-60 mm-ko lodierakoa, lortu daitezkeen transmitantzia termiko baliokidearen balioak 0.91 eta 0.59 W/m²K bitartekoak dira. Balore portzentualetan, erreferentzia kasuarekin alderatuta %63 eta %76 arteko murrizketa izango litzateke.



2. 54. Irudia- Proposatutako hormen barruko birgaitze energetiko sistemaren transmisio-termiko baliokidea isolamendu termikoaren eroankortasun termikoaren eta loditasunaren arabera (Hareharriaren eta kareharriaren eroankortasun termikoak $\lambda=1.5$ eta $\lambda=1.62$ W/mK eta jatorrizko horma guztiaren lodiera 0.4 m izanda).

2.4.2.5. Ondorioak

Lortutako emaitzek Eraikuntza Kode Teknikoaren (EKT) datu-baseak eskaintako hareharriaren eroankortasun termikoaren balioa altuegia dela erakutsi dute lan honetako ikerketa arloan erabiltzeko. Lortutako eroankortasun termikoa datu-baseak eskaintzen duena baina %50 txikiagoa da. Bestalde, kareharriaren kasuan, datu-baseak dentsitatearen arabera datu posibleen sorta handiagoa eskaintzen du. Kasu honetan, kareharrizko azterketen emaitzek antzekotasuna erakusten dute datu-basearen "caliza dura" deituriko harriarekin.

Saiakuntzen prozedurari dagokionez, bi metodoek azterketako harrizko objektuen propietate termikoak zehazteko aukera eman dute. Alde batetik, gordetako kutxa beroak aukera ematen du tenperatura oso egonkorra lortzeko laginaren bi aldeetan, honek fluxu termikoaren egonkortasuna eragiten du, eta beraz, kalkulaturako erresistentzia termikoan $\pm 5\%$ eko ziurgabetasuna dago. Aldi berean, eroankortasun termikoa zehazteko garatutako ekipoa emaitza koherenteak eskaini ditu kutxa beroaren probek erakutsi duten bezala. Kasu honetan, kutxaren alde hotzean egonkortasun termikoa lortzeko konplexutasun handiagoak daudenez eta bero-fluxua sentsore kalibratuaren bidez lortzen denez, emaitzek $\pm 13\%$ ko ziurgabetasuna erakusten dute. Horrek esan nahi du bi metodoen bidez lortutako hareharriaren eroankortasun termikoaren balioen arteko aldakuntza %6koa dela. Metodo honek abantaila bat erakusten du, izan ere, ez da beharrezkoa dimentsio handiko horma bat eraikitzea. Honek dirua eta denbora aurrezten du. Gainera, ekipamendua ikerketa honetan guztiz garatu denez, posible da jatorrizko diseinuan aldaketak egitea. Kasu honetan, Peltier zeluletan oinarritutako hozte sistemaren ordez kanpo zirkulaziorako aukera duen bainu termikoko ekipoa erabiltzea planteatzen da. Modu honetan, beroa transmititzen duen fluidoak kamara hotzaren barrutik pasa daiteke. Diseinu honen bitartez posible izango litzateke jatorrizko sistemaren arazoa saihestea. Hau da, truke azalera handituz eta tenperatura bulkada hain txikiak saihestuz, trukagailuan izotz blokeak sortzea saihestuko litzateke, eta ondorioz, ganberako hotz sistemaren funtzionamendu hobea lortuko litzateke.

Transmisio termikoaren eredu baliokideari esker posible izan da alde batetik egurrezko habeek eta beste aldetik leihoaren eta hormaren arteko topaketek sortutako zubi termikoak kontuan izatea eta horrela eragindako fluxu termikoaren gorakada detektatzea eta kuantifikatzea. Proposatutako dimentsio bakarreko parametroa erabiltzean posible izan da mota honetako topaketa espezifikoaren bi dimentsio eta hiru dimentsioko efektuak eranstea. Alderdi hau oso garrantzitsua da, izan ere, orokorrean eraikuntzen simulazio dinamikorako tresnek ez dute aukera ematen zubi termiko tridimentsionalak eranstea. Hauek ebaluatutako eraikinen



ezaugarri dira. Frogatu den bezala, zubi termikoen fluxu termiko osagarriaren efektuagatik hormen bero galera %14-%29 handitzen da.

Horma historikoen bero transmisioaren eredu parametrikokoak eta emaitzen azterketak posible egin dute katalogo bat garatzea doitze funtzioak erabiliz. Modu honetan, posible da hormen bero transmisioa zehaztea ezaugarri geometriko eta termikoen arabera. Garapen honek aukera eman du mota honetako eraikinen ohiko ezaugarrien arabera transmisio termiko balioekidearen aldakuntza minimoarekiko %57rainokoa dela zehazteko. Bestalde, materialen propietate termiko desberdinen efektua %24 eta %30 artean dago transmisio termiko gutxien eta horma lodiera berdina duen kasuarekin alderatuta. Gainera, simulazio parametrikoei lortu dute erakustea nola BITSen bidez oinarritutako esku-hartzeekin lortu daitekeen transmisio termikoaren murrizketa 40 eta 60 milimetro arteko isolamendu termikoaren ohiko lodierarekin %63 eta %76 bitartekoa izan daitekeela isolatu gabeko hormarekin alderatuta.

Atal honen ondorio bezala, zehaztutako materialen propietate termikoak datu-baseetan agertzen diren balioekiko oso desberdinak izan daitezke. Materialen jatorri naturalak konposizio askotarikoa izatea eragin dezake. Beraz, kasu honetan harrizko materialak erabiltzean nahiz eta mota berdineko harriak erabili bere ezaugarriak oso desberdinak izan daitezke erauzketa jatorria desberdina denean. Honek eragin zuzena du eraikinen karga termikoen kalkuluan eta energia hobetzeko proposamenak portaera errealekiko oso desberdinak izan daitezke. Horregatik, zalantzarik gabe, osagai opakuen karakterizazio termikoa oso garrantzitsua da hormetan harrizko materialak erabiltzen dituzten eraikin historikoen kasuan.

2.5. Ondorio orokorrak

Kapitulu honek eraikitako ondarearen ingurutzailer termikoen karakterizazioa zuen helburu gisa etorkizunean burutuko diren birgaitze energetikokoak gaur egun eraikin mota hauei buruzko informazio gabezia eskuragarri bihurtu dadin. Horretarako ikerketaren helmena Donostiako XIX. mendean diseinatutako Cortazar Zabalgunearen analisisian bideratu da.

Ingurutzailer termikoetan aire estankotasuna eta materialetatik gertatzen den bero transmisioa galera termikoen arduradun garrantzitsuenak direnez, bi parametro hauek kapitulu honetako azterketa objektu bihurtu dira. Helburu honekin saiakuntzak kapitulu honen zati nabarmena dira Blower Door Test eta eroankortasun termiko analisisien bitartez. Ingurutzailer buruzko ondorioak simulazio termikoekin lortutako emaitzekin zabaldu dira. Garatutako azterketa parametrikokoak kasu-azterketa bolumen handia aztertzei aukera eta emaitza ugari lortzea eskaini dute.

Bestalde, lortutako emaitzen eta karratu txikiaren bidezko doikuntza-metodoaren konbinazioa, eraikin mota honen portaera zehazteko ereduak garatzea ahalbidetu du, bai estankotasunarekiko galerak eta inguratzaileetan sortzen diren galera termikoak.

Beraz, emaitzen analisi orokorra aztertu ondoren, kapitulu honekin lortu diren ondorio zehatzak honako hauek dira:

- Aztertutako kasuen arabera, eraikitako ondarean aurkitu daitekeen aire estankotasunarekiko emaitza sorta zabala da. n_{50} adierazlea erreferentzia hartuz, lortutako emaitzak $0.68h^{-1}$ eta $37.12 h^{-1}$ balioen artekoan izan ziren eta bere baliokidea q_{50} erreferentzia hartutaz $0.50 m^3/hm^2$ eta $20.46 m^3/hm^2$ izan ziren.
- Lortutako airearekiko batez besteko estankotasun balioa $n_{50}=9.03h^{-1}$ edo $q_{50}=7.01 m^3/hm^2$ izan zen. Eraikitako ondarean burutuko beste ikerketekin alderatuta, ikerketa honetan lortutako emaitzak erakusten dute aztertutako eremuko kasuak ez dutela hermetikotasun maila hain baxua.
- Aire estankotasunarekiko emaitzen banaketa hiru taldetan egiten bada, %30eko laginak $n_{50}=4h^{-1}$ lortu zuten, %50ak $9.03h^{-1}$ eta $16 h^{-1}$ arteko emaitza eskaini zuten eta azkenik, hermetikotasun gutxiko kasuak %20a izan ziren $16 h^{-1}$ eta $38h^{-1}$ arteko balioak erakusten.
- Aire estankotasun emaitzak, oro har, laginen hermetikotasun falta erakutsi arren interes handia dute, izan ere eraikitako ondarean hermetikotasun altuko kasuak ere aurkitu daitezkeelako. Beraz, parametro honek eraikinen galera termikoan efektu handia duenez, bere murrizketarekin eraikin mota honen energia eraginkortasuna erabat areagotu daiteke.
- Burututako eroankortasun termiko saiakuntzen arabera, aztertutako eremuko hareharriaren balioa arauak eskaintzen duen balioa baino %50 txikiagoa da. Horrek erakusten du eraikinen birgaitze kasuetan eraikuntzako materialen ezaugarri termikoen zehaztea duen garrantzia eraikin mota hauen azterketa termiko egokiak burutu ahal izateko.
- Garapen propioko saiakuntza metodoarekin lortutako eroankortasun termikoaren aldea gordetako kutxa beroarekin lortutako emaitzekin %6a izan da. Beraz garatutako metodoa ezarritako helburuak betetzen ditu, hau da, materialaren beharrezko material kopurua eta saiakuntzaren iraupena murriztea.



- Ingurutzaille termikoen 3 dimentsioko simulazio termikoen bitartez eraikiriko ondare hormetan gertatzen diren bero galerak zubi termikoen ondorioz %14 eta %29 bitarteko galerak areagotu dezakete.
- Proposatutako transmisio termiko baliokidea ingurutzaille termikoetan zubi termikoak kontuan ahal izateko metodo egokia izatea lortu du.
- Ingurutzaille termikoen simulazio parametrikoen bitartez Barruko Isolamendu Termiko Sistemen 40-60 milimetro lodierako oinarritutako birgaitze energetikoekin jatorrizko horman sortzen ziren bero galeren %63 eta %76 bitarteko murrizketa lortzea ahalbidetzen dutela erakutsi da.

III. Kapituluia

Capítulo III

Inguratzaile termikoa esku-
hartze xede gisa

La envolvente térmica como
objeto de intervención



Laburpena:

Hirugarren kapitulua birgaitze energetiko proposamenen ebaluazio higrotermiko dinamikoari buruzkoa da. Aztertutako eraikin tipologiaren inguratazaile termikoen kanpoko babesa Barneko Isolamendu Termikoko Sistemetan oinarritutako birgaitze energetikoak burutzea dakar. Hori dela eta, BITS ezberdinen eragina lehendik dauden hormetan aztertzen da. Esku-hartze mota hauek, aldi berean, egur gapirioen osotasunaren arriskua dakar, puntu honen baldintza higrotermikoak aldatzen direlako. Horregatik, kapitulua egur usteltze ereduen aplikazioaren bitartez xehetasun horren azterketarekin amaituko du ondare historikoen birgaitze energetikoak bermatu ahal izateko.

Resumen:

El tercer capítulo versa sobre la evaluación higrotérmica dinámica de diferentes propuestas de rehabilitación energética. La protección exterior existente en las envolventes de la tipología edificatoria evaluada conlleva a tomar medidas de rehabilitación energética mediante Sistemas de Aislamiento Térmico por el Interior. Por ello se evalúa el efecto de diferentes SATI sobre los muros existentes. Este tipo de intervenciones implica a su vez a un posible riesgo de integridad de los solivos de madera existentes al verse modificadas las condiciones higrotérmicas de este punto. Debido a ello el capítulo concluirá con el análisis de este detalle a través de la aplicación de modelos de pudrición de madera con objeto de garantizar las rehabilitaciones energéticas sobre el patrimonio edificado.

3.1. Sarrera

Eraikinen eraginkortasun energetikoa hobetzeko era hedatuena inguratzaile termikoen bidezko bero galeren murriztapena da. Eraikin modernoetan inguratzaile termikoa birgaitzeko ekintzak kanpotik egiten dira Kanpoko Isolamendu Termikoko Sistemen bidez (KITS). Hauek hormaren geruza osoa babestea ahalbidetzen dute, ondorioz eraikinen portaera orokorra hobetzen delarik. Alde batetik, hormaren kanpoko akabera berriek xurgatutako euri-ura murrizten dute, hormaren hezetasunaren edukia murriztuz eta bestalde, isolamendu berriari esker lortutako bero-fluxuen jaitsieraren ondorioz, hormaren tenperatura beroagoa izatea lortzen da.

Haatik, ondare-eraikinetan kanpoko itxura arkitektonikoa mantentzeko erabiltzen diren soluzioak Barne Isolamendu Termikoko Sistemak (BITS) baitirenez, esku-hartze horien funtsezko gaia hezetasunarekin loturiko arriskuaren ebaluazioa da. Izan ere, kasu batzuetan hezetasunak kondentsazioak, lizun haziera [1,2] eta muturreko kasuetan, materialen desintegrazio arriskua [3,4] eragin dezake. Ebaluazio mota hauek simulazio numeriko eta higratermikoen bidez egiten dira, bero, aire eta hezetasun transferentziako eredu konbinatuetan oinarrituta [5,6].



Azterketa hauek eraikineko osagaien hezetasun portaera aurreikusteko aukera ematen dute, era honetan, ikerketa esperimental neketsu eta luzeak saihestuz. Eraikuntzako sektorean, Glaser metodoaren erabilera ohikoena da ingurutzaileraren bilakaera higrotermikoa ebaluatzeko [7-9]. Alabaina, eredu honetan oinarritzen diren estrategiek sisteman eragin nabarmena duten alderdi batzuk alde batera uzten dituzte. Metodo hauek kontuan hartzen dute ur lurrinaren kondentsazioa gertatzen dela ur lurrinaren presioa presio asetura iristen denean, hala nola, beira edo metaletan gertatzen den bezala. Haatik, ez du kontuan hartzen material porotsuen gaitasun higroskopikoa hezetasuna adsorbatzeko edo desorbatzeko. Bestalde, ur lurrinaren difusioa hezetasunaren transmisio mekanismo bakarra da. Zentzu horretan, zenbakizko ereduak [10-13] garrantzitsuak bihurtu dira eraikineko ingurutzailer termikoen azterketetan. Izan ere, zenbakizko ereduak Glaser metodoak kontuan hartzen ez dituen aldagai anitzak kontuan hartzen dituzte eta aldagai hauek eraikin historikoetan garrantzi handia dute. Zenbakizko metodo hauek Bero, Aire eta Hezetasun (HAM) software bidez garatzen dira, eta ebaluazio higrotermikoak egiteko metodo egokiena bilakatu dira, gaur egun tresna ugari eskuragarri daudelarik [14]. Horrez gain, gai honetako hainbat arau eta eskuliburuak laguntza eta orientazio gisa balio dute eraikinen ingurutzailerentzako ebaluazio irizpideak ezartzeko [15-18].

Arlo honetan aurrez egindako ikerketak [19-28], oro har, honako kasu hauetan oinarritzen dira: neguko klima larriak, prezipitazio ertaineko edo altuko klimak eta adreiluzko hormak dituzten eraikinak. Alabaina, orain arte badaude ikertu ez diren beste egoera mota batzuk. Kasu hauen neguko klima ez da hain larria, eta horren ondorioz auresuposatzen da hezetasun-arrisku gutxiago dutela. Baina bere berezitasunak direla eta, arrisku berdina daukate horma eta haien osagaien portaera higrotermikoari dagokionez. Alde batetik, euri-tasa handia pairatzen dute, eta bestetik, horma-konposizioan xurgapen koefiziente handiko harlanduak aurkezten dituzte. Bi faktore hauek bi arriski handi ekartzen dituzte beraiekin: hormaren hezetasun eduki handia eta prozesu patologikoak (hezetasuna, lizun haziera eta/edo egituraren degradazioa) arrisku handia dute berarekin. Paradigma hau oso sakonki ebaluatu gabe egonagatik, eraikitako ondarean erraz aurki daitezkeen ingurutzailerentzako adibide bat da. Beraz, birgaitze energetikoko diseinu berriak arazo hauek sahiesten saiatu behar dira.

3.2. Helmena eta helburuak

Kapitulu honen helburu nagusia eraikitako ondarearen energia eraginkortasuna hobetzea da Barne Isolamendu Termiko Sistema (BITS) konstruktiboaren diseinu eta ebaluaketaren sakon baten bitartez. Kasu egokienak hauteman ahal izateko ikerketa simulazio higrotermiko kanpaina bat burutuko da. Sektorean ohikoak diren

materialen analisis oinarrituko da eta, aldi berean, beraien portaera higratermikoak bereiztuko dira. Horrez gain, proposatutako sistemek deskonposizioaren aurkako irtenbide segurua izatearen betebeharra dute. Hori dela eta, egiturazko funtsezko elementu baten ebaluaketa proposatzen da, egurrezko buru-habeak.

Hortaz, kapitulu honek hurrengo helburuak ezartzen ditu:

- 3.1. Helburua** Ezaugarri higratermikoaren arabera BITS sistemetarako erabiltzen diren material nagusiak aztertu eta esku-hartze proposamen sorta bat hautatu.
- 3.2. Helburua** Proposatutako BITS soluzioen azterketa higratermiko dinamikoa burutu eraikuntzako material eta osagaietarako bero eta hezetasun aldibereko ereduak erabiliz.
- 3.3. Helburua** Proposatutako BITS soluzioen egurrezko habe-buruaren azterketa usteltze arrisku ereduaren bitartez.
- 3.4. Helburua** Hezetasunekin loturiko prozesu patologikoen garapena saihesten duten BITS soluzio zerrenda bat sortu.

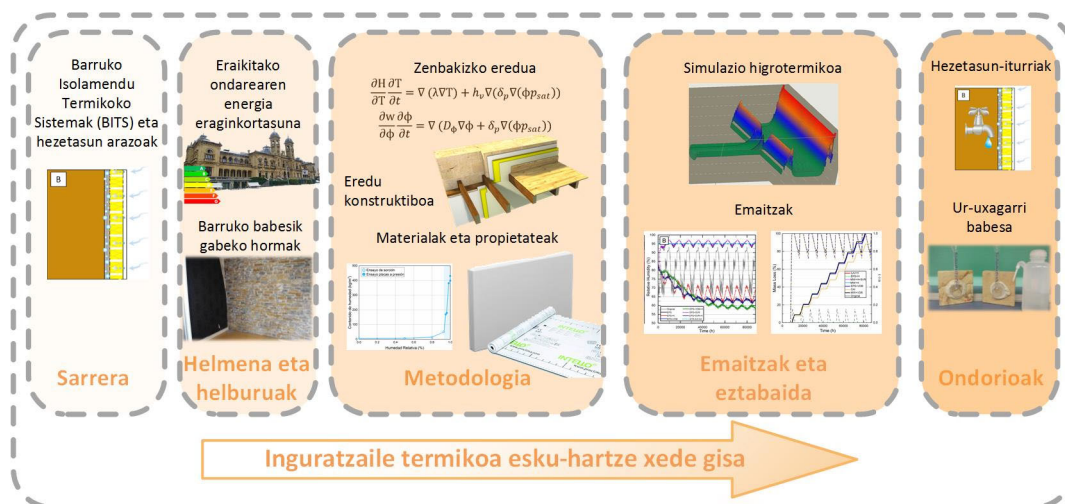
3.3. Metodologia

3.3.1. Kapituluaren egitura

Kapitulu honen sarrera eta helburuak aurkeztu ondoren, ikerketa osoan zehar burututako metodologia azalduko da. Lehenik eta behin, ikerketa-gaiaren sarrera sakonagoa egingo da literatura zientifikoaren azterketa zehatzagoa eginez. Ondoren, garatutako azterketaren detaileak aurkeztuko dira, hala nola, ebaluatzeko zenbakizko ereduak, ereduaren ezaugarri konstruktiboak, erabilitako materialak edo muga-baldintzen ezaugarriak. Azkenik, emaitzekin eta ondorioekin bukatuko da kapitulua.

Azterketak isolamendu material ezberdinen portaera kontuan hartu behar du, barneko zein kanpoko babes-materialekin edo materialik gabe. Horretarako, aldeztu aurretik erabilgarri izan daitezkeen materialen azterketa bat egin behar da.

Ikerketa hiru atalez osatuta dago. Lehenengoa simulazio-prozesuek osatuko dute, ebaluatutako hormen profil higratermikoak lortzeko. Emaitza hauek lortu ondoren hauen azterketa egingo da eta egokiak eta ez egokiak diren BITSak detektatuko dira. Hurrengo urratsen proposak diren kasuen profil erregistroen post-prozesatua egingo da.



3. 1. Irudia- Kapitulu egituraren deskribapen grafikoa

Simulazio higo-termikoak egin eta aztertu ondoren, funtzionamendu egokia betetzen dituzten BITS soluzioak detektatzea posible izango da prozesamenduaren bidez. Azkenik, azterketaren ondorioak aurkeztuko dira, etorkizuneko energia eraginkortasun esku-hartzeetarako jarraibideak zerrendatzea ahalbidetuko dutenak.

3.3.2. Barne Isolamendu Termikoko Sistemen (BITS) materialen sarrera

Gaur egun, hainbat material eta eraikuntza sistemak erabil daitezke eraikinen energia eraginkortasuna hobetzeko. Hala eta guztiz ere, arestian aipatu den bezala, eraikitako-ondarea bere esku-hartzeetan berezitasun batzuk aurkezten dituzte. Beraz, BITS-ekin lotutako zenbait gidek [30-34] esku-hartze mota hauetarako gakoak hornitzen dituzte.

Barneko isolamendua eraikitako-ondarearen energia eraginkortasuna hobetzeko erantzun posible bat bihurtu da.

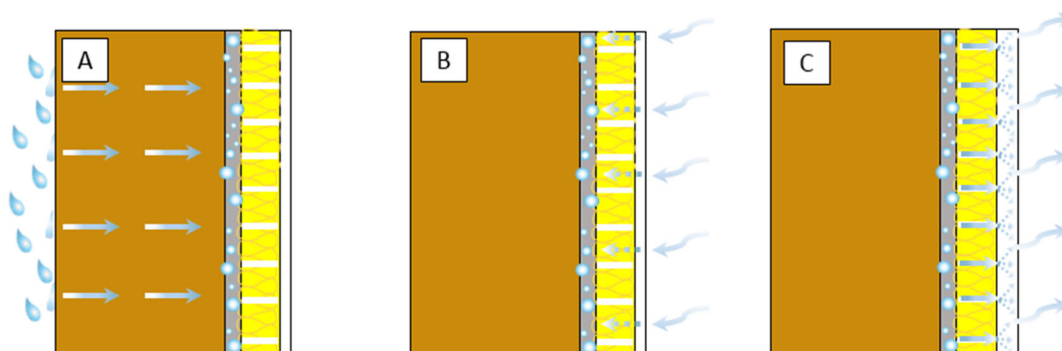
Gaur egun eraikinetan erabil daitezkeen isolamendu mota anitz daude. Mota baten edo besteren hautaketa kasu bakoitzean nagusi diren irizpideen arabera egiten da (termikoa, akustikoa, su erreakzioa, iraunkortasuna...). Xedea ingurutzailaren portaera higo-termikoa bermatzea bada, kasu honetan bezala, materialen propietate higo-termikoak kontuan hartu behar dira, eta, irizpide horren arabera [33], isolamendua honako taldeetan sailkatu daitezke: ur-lurrin iragazkorak direnak, ur lurrinaren difusioari nolabaiteko erresistentzia dutenak eta azkenik iragazkorak izateaz gain, ur kapilarreko xurgapenerako gaitasuna eskaintzen dutenak, isolamendu kapilar aktibo (IKA) gisa ere ezagutzen direnak.

Isolamenduen propietate higo-termiko desberdinak aurkezten dituztenez, BITS-etan hartu beharreko neurriak isolamendu termiko motaren arabera izango dira. Iragazkortasun handiko isolamenduetan, kanpoalderantz garraiatzen den ur-

lurrunaren fluxua handiagoa da eta, ondorioz, hezetasun pilaketaren arriskua ere handiagoa da. Alderantziko efektua du isolamendu iragazgaitzen erabilerak, izan ere, barrera bat sortzen da eta lurrun fluxua ezin da barrutik kanpora atera. Hala eta guztiz ere, barrualderantz hedatzen den lehortze prozesuan, barrera horrek emaitza bera sortzen du. Beraz, barneko hezetasun fokua badago (hodi baten haustura edo euri uraren filtrazioen bat), prozesu patologikoa gerta daiteke.

Azken bi isolamendu mota hauek proposatzen badira diseinua sakonki ebaluatu behar da. Horrela ez izatekotan sistema arriskuaren eraginpean jarri daiteke kondentsazioak ager daitezkeelako eta isolamendu geruzaren hezetasun pilaketa areagotu daitezkeelako [32,35].

Arazo honi irtenbideren bat aurkitzeko, Isolamendu Kapilar Aktiboak deiturikoak (IKA) sarritan erabiltzen dira hezetasun likidoa barneko umel geruzatik etxe barruko azalerara garraiatzeko gaitasuna dutelako. Lehortze prozesu hau isolamenduen urxurgapen altuko koefizientearen bidez lortzen da, A_w [36,37]. Ikertzaile askok [20,38,39] isolamendu mota hau ebaluatu zuten ikuspegi desberdinekin eta denak emaitza hobekak erakutsi zituzten ohizko isolamenduekin alderatuta. Halarik ere, Vereckeen et al. [40] iruzkintzen duten bezala, oso garrantzitsua da IKA desberdinen funtzionamendua bereiztea. Honen arrazoia da, gaur egun, eroankortasun likido txikia eta A_w txikia duten isolamendu sorta zabala dagoela, beraz, hezetasuna lehortzeko gaitasuna ere txikiagoa dute, hala ere IKA deritze. Horregatik, propietate higrotermikoak behar bezala ziurtatzea funtsezkoa bihurtzen da.



3. 2. Irudia-Isolamendu Kapilar Aktiboaren (IKA) funtzionamendu higrotermikoa.

Isolamendu termikoak ez dira BITSetan garrantzi duten material bakarrak. Egile askok ondorioztatu dute [19,20] barnealdeko isolamenduaren erabilerak hormako uraren edukia areagotzen duela. Hortaz, euriak horman sortzen duen umeltasunaren areagotzea saihesteko, kanpoko geruzan ur-uxagarrien erabilera ezinbestekoa bihurtzen da. Material mota hauetan, A_w balioaz gain, lurrun-difusioaren koefizienteak [41,42], δ_p , garrantzi handia du barnealdeko lurruna kanporatzeko eta



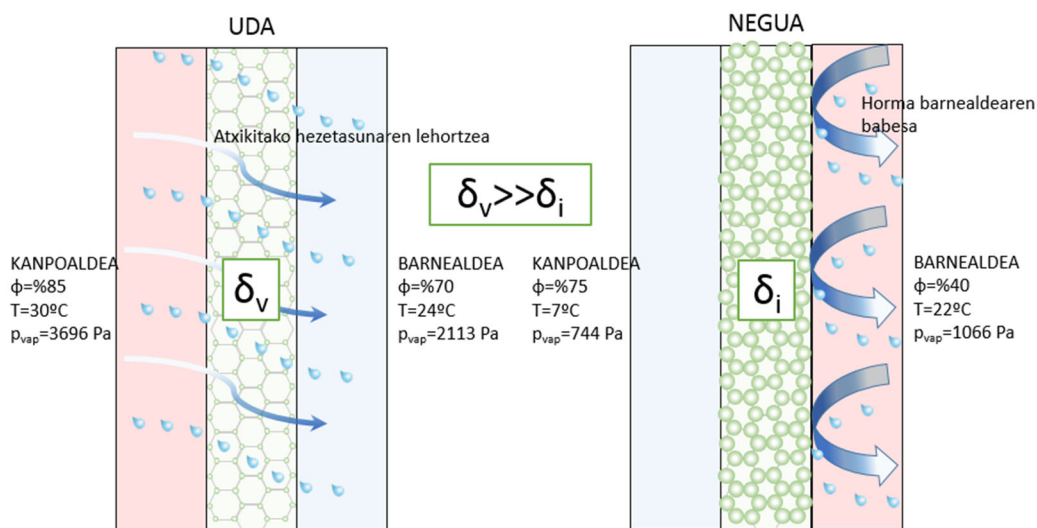
kondentsazio interstizialak saihesteko [43]. Guizzardi et al. [21] gaia azertu zuten kanpoko entokatu desberdinen (karea, kare-porlan morteroa, porlan-kare morteroa eta porlana) eta hiru isolamenduren ebaluazioaren bidez. Lortu zuten ondorioa, ebaluatutako materialetatik konbinazio onena porlaneko entokatua, bere A_w baxuko balioari esker, kaltzio silikato isolamenduarekin izan zen, bere erreakzio kapilar aktiboaren portaera dela eta.

Hala eta guztiz ere, sarritan ezin dira fatxadaren kanpoaldeko azaletan mota haueko ur-uxagarri entokatuak erabili, fatxadaren ondare-balioa aldatzen baitute, harrizko edo adreiluzko hormen kasuan adibidez. Silikonan oinarritutako tratamenduak aproposak izan litezke eraikin historikoen fatxadentzat izan ere, silikonaren gardentasunak aspektu estetikoa mantentzen du. Produktu hauekin lortzen diren A_w baxua eta δ_p altuko propietateak euria fatxadetatik aldaratzea lortzen dute, kontaktu angelu estatikoa θ [44] handituz eta, aldi berean, horma lehorte prozesua baimenduz. Bestalde, garrantzitsua da azpimarratzea produktu hauek barneko isolamenduarekin batera aplikatzen direnean, azken hauek geroago instalatu behar direla, horrela, hormak hasieran duen gehiegizko hezetasuna azkarrago lehor dadin [22].



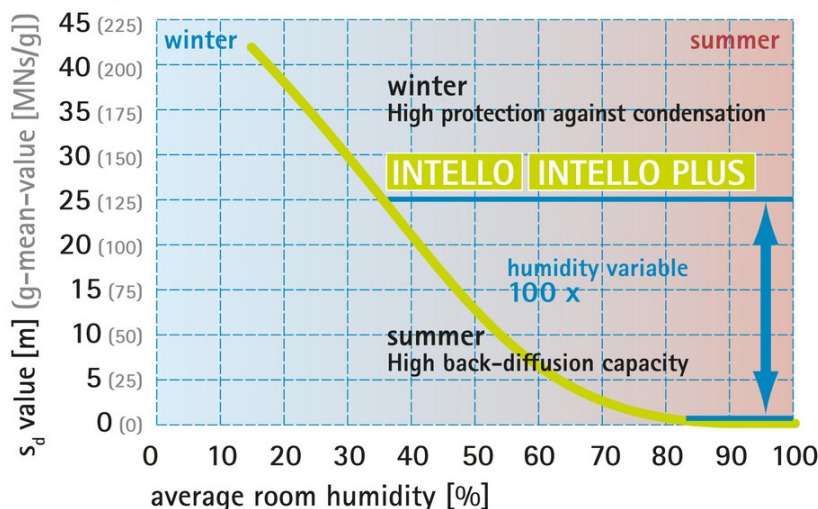
3.3. Irudia-Ur uxagarri produktu baten erabilera eta bere efektua egurrezko lagin batean.

Beste material gehigarri batzuk lurrun-difusioaren barrerak (LDB) [45] dira, lurrunaren difusioa zailtzen duten barrutik kanporantz eta horrela saihesten da hotz geruzaren kondentsazioa. Alabaina, horrek aldiberean barrurantz hedatzen den lehorte prozesua saihesten du, beraz, kanpoko hezetasun-iturri bat badago (euri tasa handia, ur hodi hautsiak...) hezetasun arazoa egongo da. Arazo hau konpontzeko, lurrun atzeratzaile adimentsuak (LAA) garatu ziren. Udan barnealderantz hezetasun difusioa baimentzen dute bere lurrun iragazkortasun aldakorraren bidez, δ_p , 3. 4. eta 3. 5. Irudiak. Ostera, material horien funtzionamendu egokia neurri handi batean langile lana kalitatearen eskuan dago, mintzaren jarraitasuna eta hermetikotasuna bermatzeko.



3. 4. Irudia- Lurrin atzeratzaile adimenduen funtzionamendua.

s_d value (g-mean value) with different moisture influences



3. 5. Irudia- Lurrin atzeratzaile adimenduen lurrin iragazkortasun aldagarria.

Barruko isolamendua eta, bereziki, egurrezko egiturak dituzten eraikinetan interesa pizten duen kezka nagusietako bat zurezko habeak dira. Izan ere, puntu hauen baldintza higrotermikoak nabarmen alda daitezke hasierako isolamendu gabeko baldintzekin konparatuta, hezetasuna areagotuz, temperatura eta lehorte potentziala murriztuz eta, ondorioz, deskonposizio arriskua areagotuz, 3. 6. Irudia.

Azken lerro hauen xedea modu orokorrean horretan erabil daitezkeen BITS soluzioak irudikatzea izan da. Hainbat soluzio azaldu dira eta isolamenduen, mintzen eta babes-produktuen arteko konfigurazio desberdinei esker BITSen diseinui erantzuna ematea posible dela erakutsi da. Hori dela eta, hurrengo ataletan soluzioen ebaluazio sakona egiten jarraituko da, haien arteko desberdintasunak zehaztuko dira eta teknikoki bideragarriak ez direnak baztertuko dira.



3. 6. Irudia-Egurrezko habe buruaren usteltzea, Easo 22 kaleko adibidea.

3.3.3. Simulazio eredua

3.3.3.1. Zenbakizko eredua

Simulazio higratermikoak garatzeko, Fraunhofer IBPren WUFI Pro v.6.2 eta WUFI 2D v.4.1 softwarrak erabiliko dira. Bi software hauek oso erabiliak dira analisi higratermikoak egiteko eta gainera EN 15026 [15] estandarraren zehaztapenak betetzen dituzte. Aztertuko den bezala, lehenengoak simulazio orokorren multzoa gauzatuko du, honela lehenengo ondorioak lortuko direlarik. Bigarren softwarra egurrezko habeen muturreko ebaluazio zehatza egiteko erabiliko da, lortutako lehen ondorioetan oinarritutako kasuen arabera. Bi dimentsioko softwarrarekin kasu guztiak ez ebaluatzeko arrazoiak honakoak dira: (1) lehen programarekin kasu desberdinen portaera orokorra detektatu ahal izango da eta (2) 2D-k sortutako datuen bolumena simulazio handiko denbora dakar. WUFIk erabiltzen dituen aldi bereko bero eta hezetetasunaren garraio ekuazioak honako hauek dira:

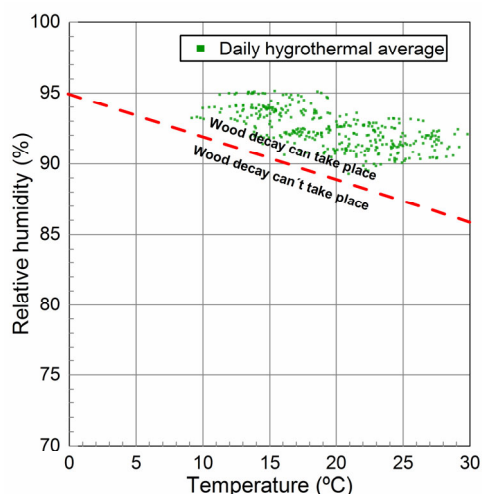
$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + h_v \nabla (\delta_p \nabla (\phi p_{sat})) \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla (D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{sat})) \quad (2)$$

$$D_\phi = D_w \frac{\partial w}{\partial \phi} \quad (3)$$

non $\partial H/\partial T$ eraikuntzako heze materialen bero biltegitze-ahalmena da (J/kg), $\partial w/\partial \phi$ hezetetasun biltegitze-ahalmena (kg/m³%), w hezetetasun edukia (kg/m³), λ eroankortasun termikoa (W/mK), D_ϕ likido gidatzeko koefizientea (kg/ms), D_w garraio koefiziente kapilarra (m²/s), δ_p ur-lurrunaren iragazkortasuna (kg/ms Pa), h_v ur lurruntze-entalpia (J/kg), p_{sat} ur-lurrunaren saturazioa presioa (Pa), T temperatura (K) and ϕ hezetetasun erlatiboa (%).

Azkenik, datuen ondorengo tratamendua egingo da egurraren usteltze eredua aplikatuz. Gaur egun, bi dira ohi erabiltzen diren ebaluazio ereduak. Lehenengo ereduak WTA 6-8-an [29] oinarrituta, egur poroan airea eguneroko batezbesteko hezetasun erlatiboa (egurraren 10 mm-ko puntu kritikoenaren batez bestekoa) ezin du gainditu %95-0°C eta %86-30° arteko muga, 3. 7. Irudia. Salbuespenak onartzen dira epe laburrerako muga txikiko urraketa kasuetan.



3. 7. Irudia- WTA 6-8-an oinarritutako egur usteltze ereduak.

Hala ere, eredu honek ez ditu salbuespen hauek zehazten eta ez du portaera dinamikoa ebaluatzen ezta horren eragina egurren. Egurraren arrisku ebaluazio zehatza egiteko, Viitanenek [3,4] garatutako Decay Modeloa erabili daiteke. Eredua onddoen aktibazio prozesuaren ($\alpha = 1$) garapen osoan oinarritzen da eta honek deskonposizio prozesuaren hasiera eragiten du masa galera-tasaren (ML) bitartez:

$$\alpha(t) = \int_0^t d\alpha = \sum_0^t (\Delta\alpha) \quad (4)$$

Onddoen aktibazioa baldintza jakin batzuetan bakarrik gertatzen da. Temperatura 0°C baino altuagoa eta hezetasun erlatiboa %95 baino handiagoa izan behar da prozedura has dadin. Baldintza hauek betetzen ez badira, α parametroa gutxitzen da, ondorioz lehorte prozesua hasten da eta masa galera gelditzen da. Hala ere, hau galera berreskurazekin bat da. $\alpha = 0$ bihurtzeko behar duen denbora bi urte suposatzen da (17520 ordu):

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta t}{t_{crit}(RH, T)} \text{ noiz } T > 0^\circ\text{C} \text{ eta } RH > \%95 \text{ direnean} \quad (5)$$

$$\Delta\alpha = -\frac{\Delta t}{17520} \text{ beste kasutan}$$

$$t_{crit}(RH, T) = \left[\frac{2.3T + 0.035RH - 0.024T \cdot RH}{-42.9 + 0.14T + 0.45RH} \right] \cdot 30 \cdot 24 \text{ [ordu]} \quad (6)$$

Onddoen aktibazioak egur masa galera eragiten du tenperatura eta hezetasun erlatiboaren arabera:

$$ML(t') = \int_{t \text{ at } \alpha=1}^{t'} \frac{ML(RH, T)}{dt} dt = \sum_{t \text{ at } \alpha=1}^{t'} \left(\frac{ML(RH, T)}{dt} \cdot \Delta t \right) \quad (7)$$

non:

$$ML(RH, T) = -5.96 \cdot 10^{-2} + 1.96 \cdot 10^{-4}T + 6.25 \cdot 10^{-4}RH \left[\frac{\%}{\text{ordu}} \right] \quad (8)$$

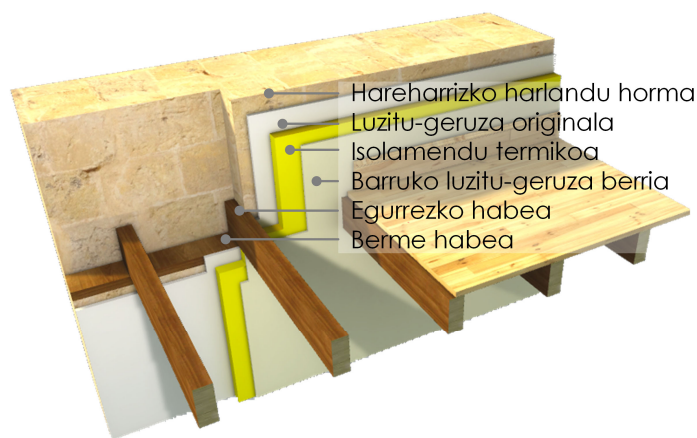
Eraikuntzako material eta osagaietan hezetasun-garraio gaiaren oinarriak sakondu nahi izanez gero 8.1. Eranskina gehitu da. Hezetasunaren garraiatzeko eta biltegitzeko mekanismoak eta propietateak azaltzen dira, eraikuntzako elementuetan eragiten dituzten muga-baldintzak ere aurkezten dira.

3.3.3.2. Eredua konstruktiboa

Simulatu beharreko eredua eraikin historikoen tipologia guztirako elementu hedatuena izan beharko luke. Eraikin mota hauen ezaugarriak harlanduzko horma lodi eta barruko egurrezko egituren erabilera da.

Hormaren ebaluazioa funtsezkoa da inguratzaile termikoa osatzen duelako eta egurrezko egitura lotzen duelako; horren ondorioz, ebaluazioaren xehetasun bezala hautatuko da puntu hau.

Hiriko eraikinen ezaugarri konstruktiboek dagokienez, aurretiaz aipatu bezala, gehiengo handia hareharrizko harlangaitzez osatutako hormak dira, 40 eta 70 cm arteko lodierarekin. 3. 8. Irudian proposatutako BITS soluzioa erakusten da. Horman egurrezko karga habeen konexio tipikoa bere berme habearekin ere irudikatzen da.



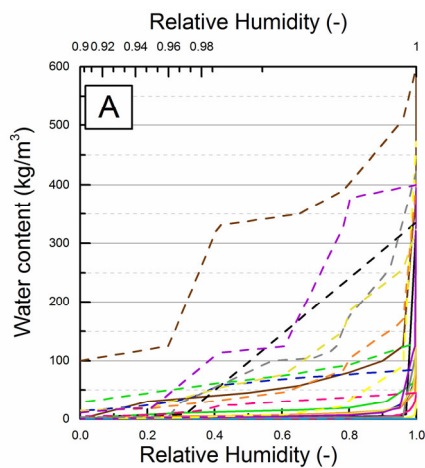
3. 8. Irudia- Ebaluazio higrotermiko ereduaren deskribapen geometrikoa.

3.3.3.3. Materialak eta propietateak

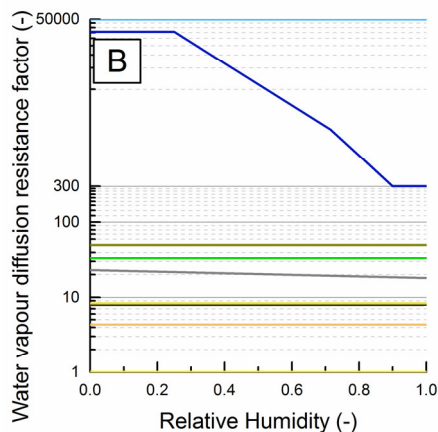
Lehen azaldu den bezala, ereduak soluzio mota ezberdinekin egingo ditu simulazioak sistema horien portaera higrotermiko orokorra antzemateko. Isolamenduen aukeraketa egiteko kontuan hartuko da isolamenduen sailkapen orokorra portaera higrotermikoaren arabera [33]. Honek isolamenduak hiru motatan sailkatzen ditu: ur-lurrun iragazkorrak direnak, ur-lurrun iragazkortasun propietatea edukitzeaz gain xurgapen kapilar gaitasun handia eskaintzen dutenak, hau da, IKAak eta, azkenik, nolabaiteko iragazkortasun erresistentzia dutenak erabat iragazgaitzak izan gabe.

Gehienetan, BITSen esku-hartzeak lehen motako isolamenduekin egiten dira, mineral artilezko isolamenduen (MW) bidez eta, kasu batzuetan, barnealdean LDB bat erantsiz. Soluzio horiek kondentsatutako hezetasuna barnealdera hedatzen uzten ez dutenez, alternatiboki LAAen eta IKAen portaera aztertuko dira haien erantzun egokia zein den egiaztatzeko. Bestalde, lurrun iragazkortasun erresistentzia duen isolamenduaren ebaluazioa ere burutuko da oso erabilia den material baten bidez, poliestireno hedatua (EPS). Azkenik, fatxada babesteko kanpoko uxagarrien (H) aplikazioaren efektua kontuan hartuko da euriaren xurgapena murrizteko eta horrela hormaren hezetasunaren metaketa ere murrizteko.

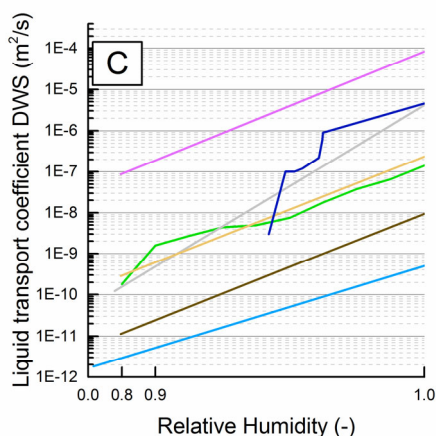
Erabilitako softwareak materialen datu-base zabala duenez, bere erabilera egokitzat hartu da simulazioak burutzeko. Erabilitako materialen propietate higrotermikoak 3.9.-3.11.Irudietan azaltzen dira. Lehenengo ikuspuntu batetik eta bilatzen zen bezala, materialen erantzun desberdinak ikus daitezke. Hezetasun eduki grafikoa erakusten du material batzuen hezetasun handiko biltegitratze-ahalmena, hala nola, harearria, izeia, jatorrizko barruko igeltsua edo igeltsu berria, eta, alderantziz, biltegitratze zero edo txikia duten materialena, mintzak (LDB eta LAA) eta EPS. Hezetasun gaineko edukiaren aldakuntza handia dela eta, goiko aldean bigarren ardatza eta marra etenak gehitu dira ezaugarriak hobeto definitzeko. Lurrunaren difusioarekiko erresistentziari dagokionez, mintzen eta gainerako materialen arteko desberdintasun handia ikus daiteke. Aldi berean, LAAaren funtsezko ezaugarria behatu daiteke, bere difusio koefizientearen aldakuntza. Beste aldetik, likidoa garraitatzeko portaerari dagokionez, nabarmentzekoa da IKAren garraio jardueraren diferentzia gainerako materialekin alderatuta. EPSaren, isolamendu mineralaren eta mintzen ezgaitasuna likidoa garraitatzeko ere adieraztekoa da.



3. 9. Irudia- Erabilitako materialen hezetasun biltegitratze gaitasuna.



3. 10. Irudia-Erabilitako materialen lurrun-difusioarekiko erresistentzia faktorea.

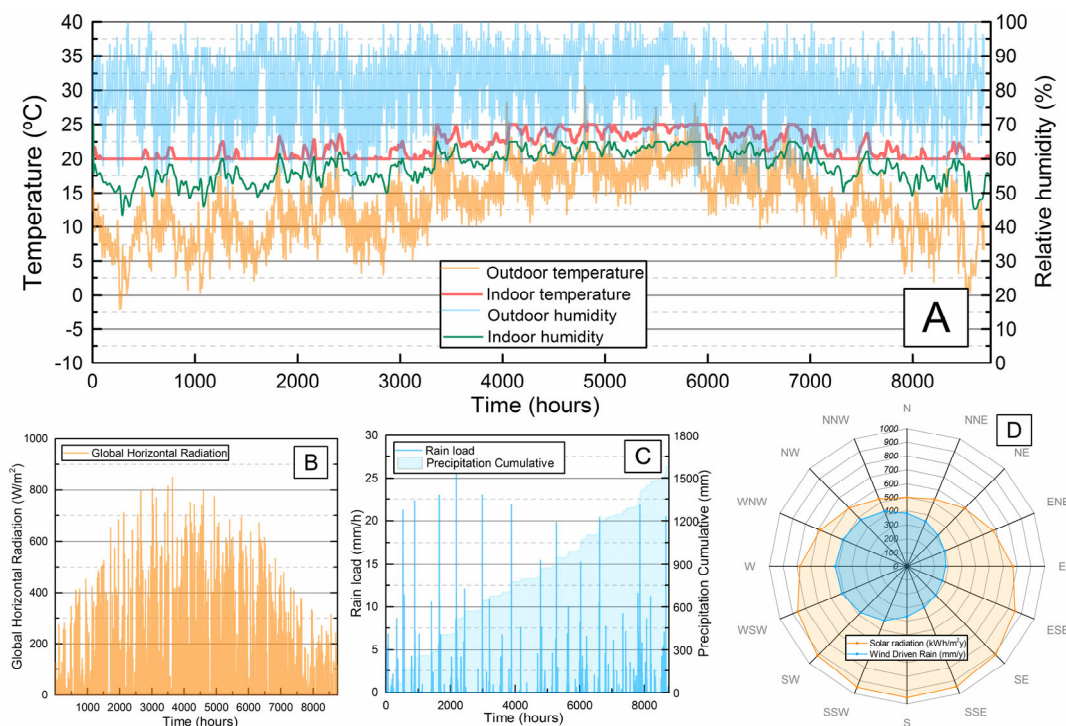


3. 11. Irudia-Erabilitako materialen garraio likidoaren koefizientea.

3.3.3.4. Muga-baldintzak

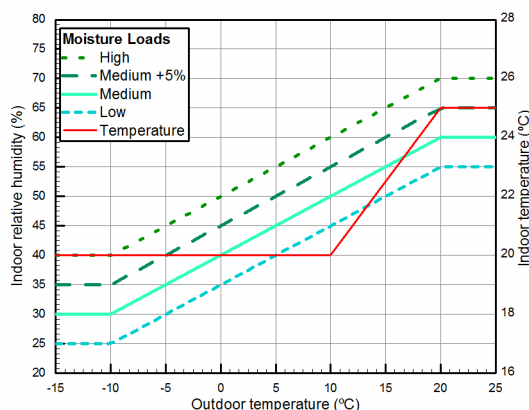
Simulazioetarako kontuan hartu diren barne eta kanpoko baldintzak 3.12.Irudian aurki daitezke. Barruko baldintzak WTA 6-2 gidan oinarritzen dira 4.2 atalaren arabera

[17]. Eredu honetan, barruko tenperatura eta airearen hezetasuna kanpoko tenperaturaren funtzio dira, 3. 13. Irudia. Hurrengo azterketa diseinu faseko eredu batean oinarritzen dela kontuan izanda, hezetasunerako karga ertaineko kasua kontuan hartu da %5eko segurtasun koefiziente marjina gehituz. Beste aldetik, Meteoronormeko datu-basea euskarri izan da kanpoko klima-baldintzak ezartzeko [46].



3. 12. Irudia-Simulazio ereduatarako erabilitako barne eta kanpoko ingurune muga-baldintzak: A) Tenperatura eta hezetasun erlatiboa; B) Eguzki erradiazioa; C)Prezipitazioa; D) Fatxadetan haizeak eragindako euria eta eguzki erradiazioa.

Donostiako klimak tenperatura moderatua izan arren, urte osoan zehar hezetasun (grafikoa A) eta prezipitazio-tasa handiak ditu (grafikoa C). Funtsezkoa da fatxaden plano bertikalen benetako esposizioa aztertzea (grafikoa D), ebaluazioaren orientazioa horren arabera izango baita. Ikus daitekeenez, euriaren eraginik handiena mendebaldeko fatxadan da, eta horregatik, simulazioetan orientazio hau aztertzea hautatu da kasu kaltegarriena irudikatzen duelako.



3. 13. Irudia- Gela baten barruko temperatura eta hezetasun erlatiboa, kanpoko aire tenperaturaren arabera eta WTA 6-2an oinarrituta.

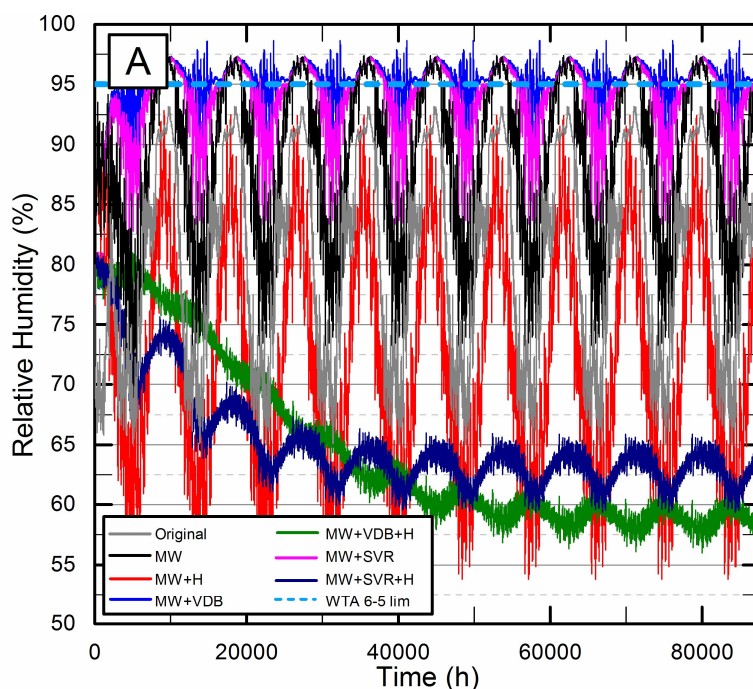
3.4. Emaitzak eta eztabaida

Atal honek eredu zehatza ebaluatuko du. Lehenik eta behin, alde aurretik eztabaidatutako aukerak aztertuko dira, esku-hartze bideragarrienak antzemateko eta portaera anomaloa detektatzeko Wufi Pro bidez. Ondoren, azterketa zehatzagoa egingo da egurrezko habearekin Wufi 2D eta aurreko analisietan proposatutako konponbideak erabiliz. Bestalde, gomendatzen ez diren konponbideekin ere egingo da azterketa, honela planteatu ahal luketeen arriskua erakusteko. Horretarako, egurraren deskonposizioaren eredu aplikatuko da eta bere bilakaera aztertuko da sistemaren egokitasuna zehazteko.

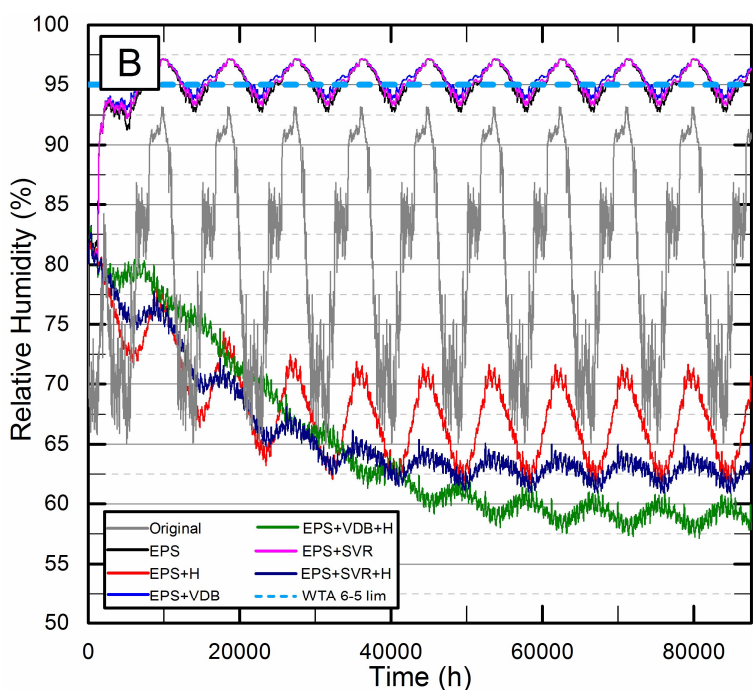
Hasi aurretik, isolamenduen ebaluazioaren lodierarekin loturiko gai garrantzitsu bat aipatu behar da. Lodi bereko materialak erabiltzea logika badu ere hauek, eroankortasun termiko desberdinak dituzte. Alde batetik, lortutako energia-hobekuntza aldeak izango liriateke eta, bestetik, hormaren tenperatura distribuzioa bere lodieran zehar ere ezberdinak izango liriateke. Azken gertaera horrekin batera, deskonposizio-eredua aplikatuz, kasu desberdinek tenperatura-diferentziekin ebaluatuko liriateke eta, beraz, ezin izango liriateke kasu konparatiboak izan. Gehiegizko lodiera batek barruko azalera baliagarriaren galera nabarmen bat ekar dezakeela kontuan hartuta, 40 mm-ko isolamendu tradizionalen erabilera egokia dela usten da, isolamendu minerala bezala. Horrela, 50 mm-koa izan beharko luke EPSrako eta 52 mm-koa IKArezentzat, eroankortasun termiko handiagoa dela eta.

3.4.1. Profil higrotermikoa

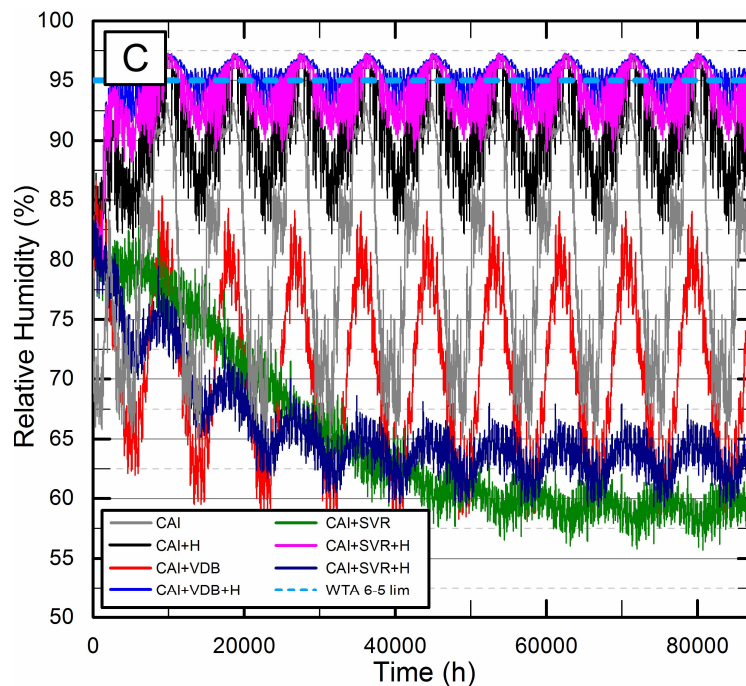
3.14.-3.16.Irudietan Wufi Prorekin egindako simulazio-kanpainaren emaitzak erakusten dira. Horien artean, joera batzuk bereizi daitezke.



3. 14. Irudia- 1D simulazioetan lortutako hezetasun erlatiboaren profilak isolamenduaren atzeko geruzan isolamendu mineralaren kasuan (MW).



3. 15. Irudia- 1D simulazioetan lortutako hezetasun erlatiboaren profilak isolamenduaren atzeko geruzan poliestireno hedatuaren kasuan (EPS).



3. 16. Irudia- 1D simulazioetan lortutako hezetasun erlatiboaren profilak isolamenduaren atzeko geruzan isolamendu kapilar aktiboaren kasuan (CAI).

Lehen ez kanpoko ez barruko babesik duten soluzioekin zerikusia du, hau da, ez dute ez ur-uxagarri (H) ez barruko mintzik (LDB edo LAA). Lehenik eta behin, ikus daiteke oreka higrotermikora azkar iristen dela hormaren esposizioa kanpoko eta barruko hezetasun iturriei handiago delako. Ikus daitekeen bezala, hiru BITS soluzioek jatorrizko horma baino hezetasun erlatibo handiagoa sortzen dute. Arrazoiak bikoitza da: alde batetik, euriak kanpoko hezetasun iturri bezala, horman erraz sartzen da eta, bestetik, jatorrizko hormaren lehorte-ahalmena murriztu egin da hormaren tenperatura murriztu egin delako barruko isolamendu aplikazioaren ondorioz. Isolamenduei dagokienez, ikus daiteke MW eta IKAREN kasuan, EPSrekin alderatuta, haranen eta gailur higrotermikoen profila nabarmenagoak direla ur-lurruneko iragazkortasunaren ondorioz. Ezaugarri horri esker, udako aldietan hotzetan pilotutako hezetasuna murriztu daiteke. Hala ere, WTA 6-5 [34] ezarritako zehaztapenen arabera eta sistema hauei dagokienez, ezin da bakar bat ere gomendatu, %95eko hezetasun erlatiboaren muga gainditzen baitute eta, beraz, ingurutzailerako gehiegizko hezetasun arriskua edukiko luke.

Antzeko portaera bat antzematen da, baina areagotuagoa, isolamendua barne mintz batekin erabiltzen den kasuetan. Mintz hauen erabilerak dagoeneko hormaren barruko hezetasun handiaren lehorte-ahalmenearen murrizketa ondorioztatu dezake eta, beraz, harrapatuta gera dadin.

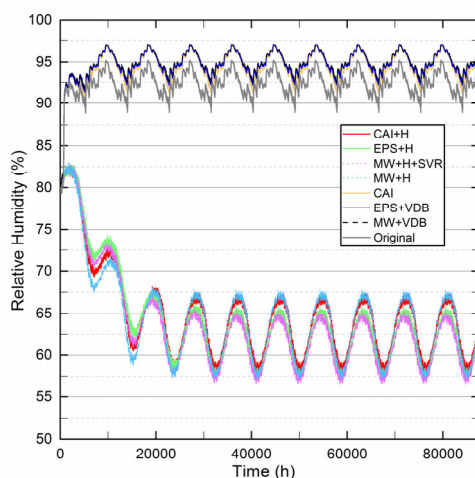
Bestalde, ur-uxagarri bakarra erabiltzeak EPSaren kasua zeharo hobetzen du, nabarmenki IKAREN eta mineral artilezko isolamenduaren kasuan hobekuntza

hautemangarriak ikus daitezke. Emaiza hauek isolamenduen lurrin difusioaren portaerarekin bat doaz. Kanpoko hezetasun-iturria kasu guztietan efektua ez dezan lortu bada ere, barne-hezetasun iturria jarraitzen du eta isolamenduen lurrin-difusioarekiko erresistentzia aldea da ebaluazio-puntuak sortzen duen desberdintasunen arrazoa. Isolamenduaren lurrin-difusioaren erresistentzia gutxitzen den heinean, hezetasuna areagotzen da ebaluazio-puntuak. Kasu berezi honetan, irtenbide guztiak kontuan hartu ahal izango lirateke, 95% muga gainditzen ez dutelako. Hala eta guztiz ere, kontuan hartu behar da, isolamendu mineralaren kasuan, mugatik hurbil dagoenez arreta berezia jarri beharko litzaiokela, horregatik, saihestu behar den kontingentzia kasu bat da.

Azkenik, teknikoki simulazio emaitzarik onenak eskaintzen dituzten konponbideak geratzen dira, hau da, ur-uxagarria edukitzeaz gain, barnealdeko mintzak erabiltzen dituztenak. Kasu hauetan ikus daitekeen bezala, oreka erregimena 4 urteko iraupen luzeagoan lortzen da. Gertaera honen arrazoa, mintzen erabileran datza. Horma barneko hezetasun iturritik disoziatuta dago eta pixkanaka hasierako hezetasuna askatzen du. Garrantzi handia du LDB eta LAren arteko desberdintasuna nabarmentzea. Lehenengo mintz motek hezetasun maila txikiagoa eta laua eskaintzen dute hiru isolamendu kasuetan, hezetasun gutxiago sartzen uzten dutelako horma barruan. Hala eta guztiz ere, LAA kasuek hezetasun handiagoa dute eta profil nabarmenagoa dute, eta horrek urtaroen arteko aldakuntza garaiagoak erakusten ditu. Hau da, hezetasun erregistroen profilen gailurrak eta haranak nabarmenagoak dira eta LAAk, bere udako lurrin iragazkortasuna handiagoari esker, barrualderantz ahalbidetzen duen lehortze prozesuari esker gertatzen da. Kontuan izan behar da, EPS kasuan, gailurrak eta haranak ez direla hain nabarmenak, isolamenduak berak lurrin difusio barrera gehigarri bat bezala funtzionatzen duelako. Arestian aipatu bezala, LDBk teknikoki portaera onena frogatu duen arren, kontuan hartu behar da kontrolik gabeko hezetasun iturria sortzekotan (instalazio oker bat, kanpoko ur-uxagarriaren mantentze falta, hodien ur-ihesa...), une horretan hezetasuna pilotuko litzatekeela konponbide zaileko problema bat sortuz. Gainera, IKA isolamenduaren kasuan, kontuan hartu behar da mintz hauen erabilerak ez duela zentzurik, isolamenduak kondentsazio geruzan, bere funtzio kapilarrari esker, sortutako hezetasuna xurgatu ondoren, hezetasun hau barrualderantz zuzentzerakoan mintzarekin topatuko luke pasatu ezin gabe eta horrela beste larrialdi bat sortuko litzateke hezetasuna pilotuta geratuko litzatekeelako.

Egurrezko habearen puntu kritikoaren portaera espezifikoa erakusteko, kasu-azterketen aukeraketa bat egin da hurrengo atalean ebaluatzeko. Hautapen irizpideak portaera higrotermiko bereiztua duten kasuen ebaluazioan oinarritzen dira,

duen bero-fluxua da, isolamendu ezaren ondorioz, isolatutako eta ur-uxagarri gabeko hormekin alderatuta, hezetasun maila txikiagoa lortzearen arrazoia.



3. 18. Irudia-Egurrezko habearen 2D simulazio higrotermikoetatik eratorritako hezetasun erlatiboaren profilak.

Isolatutako eta ur-uxagarri gabeko kasuei dagokionez, erakutsi duten profil higrotermikoa jatorrizkoarena baino altuagoa da. Profilak %95eko muga denbora luzez gainditzen duenez onartezina da; beraz, hondatzeko arrisku handia dago. Gainera, azterketa honen bidez, garbi erakusten da IKAre kasua arriskutsua dela, egurrezko habearen hezetasuna profila 1D simulazioak eman duena baino hezetasun handiagoa duelako. Horren zergatia isolamendua dagoen lekuan (1D simulazioa) xurgatzeko propietatea eskaini daiteke eta horrela metatua geratutako hezetasuna murriztu; aitzitik, egurrezko habearen, isolamendua ez dagoenez, ez dago hezetasuna xurgatzeko ahalmena eta, beraz, metatuta geratzen da. Beste aldetik, MW+H kasuaren aurreko zalantzari dagokionez, emaitzak erakusten dute hezetasun-profila puntu honetan nabarmenki murriztu dela, portaera apartekoa eskaintzen duelarik gainerako kasuak bezala.

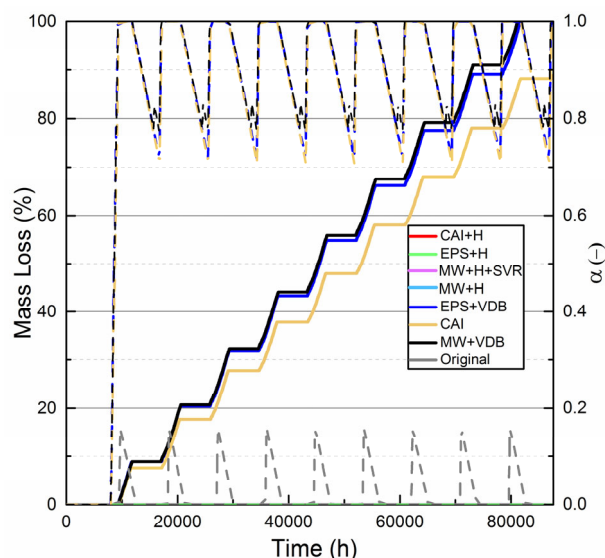
3.4.2. Egur usteltze arrisku azterketa

Azkeneko urratsa 2D simulazioaren emaitzak egur usteltze ereduaren inplementatzean datza. Nahiz eta aurreko simulazioekin zein kasu arazo potentziala sor dezaketen susmatu ahal arren, arriskua ezin da kuantifikatu profil higrotermikoak soilik erabiltzen direnean. Hortaz, Viitanenek garatutako egur-usteltze ereduaren erabili da azterketa gauzatu ahal izateko.

3.19. Irudiak usteltze ereduaren emaitzak erakusten ditu, hau da, onddoaren aktibazio fasea (α) eta onddoaren aktibazioak eragiten duen egurraren deskonposizio eboluzioa. Ikus daitekeenez, ur-uxagarri duten konponbideek ez dute inolako

usteldura prozesurik, ezta onddoen garapenik pairatzen, izan ere ez dute %95eko hezetasun erlatiboa gainditzen.

Hala eta guztiz ere, jatorrizko horman ikus daiteke %95eko muga une oso zehatzetan gainditzen dela, eta horren ondorioz, onddoaren garapen-fasean hasten da baina bakarrik $\alpha=0.15$ balio maximoa lortzen, beraz, ez dago egur deskonposizio arriskurik. Alabaina, hau ez da ur-uxagarrikerik ez duten kasu bera. Ikus daitekeen bezala urte batean onddoaren aktibazioa gertatzen dela eta, zuraren deskonposizioarekin jarraitzen du. Kasu horien simulazioen erregistro higrotermikoak antzekoak direnez berdin gertatzen da egurraren deskonposizio eboluzioarekin. Ikusi daitekeen desberdintasun bakarra IKAREN aurreratze abiadura txikiagoa dela MW+LDB eta EPS+LDB kasuekin alderatuta.



3. 19. Irudia- Egurraren desintegrazio prozesua eta onddoen aktibazioa egurrezko habean aztertutako puntuan Viitanen eredu aplikatuz.

Horrela, ur-uxagarrikerik ez duten eraikinen energia-birgaitzeko BITS esku-hartze guztiek arrisku ez onartezina dakarte. Ikusi ahal izan den bezala, jatorrizko hormak egitura osoaren funtzionamendu egokia lortzen du eragiten diren bero-ihesiek lehortze-prozesua sortzen dutelako, aldiz, BITS soluzioetan prozesu hau ez da gertatzen. Beraz, hormaren kanpo babesa funtsezkoa bihurtzen da eraikitako-ondarearen inguratzaile termikoko esku-hartzeetan.

3.5. Ondorioak

BITS aukerak ezin hobek bezala aurkezten dira eraikitako ondarearen eraintortasun energetikoa era pasiboan hobetu ahal izateko. Kapitulu honetan BITS soluzioen ebaluazio higrotermiko eta dinamikoak garatzeko metodologia aurkeztu egin da. Horretarako, aurrez esku-hartze mota hauetako material egokien aukeraketa egin da eta, ondoren, beraien ebaluazioa konbinazio desberdinak erabiliz. Proposatu diren

aukera konstruktiboen emaitzek profil higrotermikoei dagokionez ezberdintasun handiak erakutsi dituzte hautatu diren materialen propietate desberdinen ondorioz. Beraz, agerikoa da ebaluazio sakonak burutu egin behar direla esku-hartze mota hauetan sistemen funtzionamendu egokia bermatu ahal izateko eta horrela etorkizuneko ustekabeak saihesteko.

Ebaluatu diren kasu guztietan frogatu da euri-uxagarria ez erabiltzeak inguratzaille termikoarentzat arrisku onartezina dakarrela. Hormaren lehortze-ahalmen murrizketa, barneko isolamendua erabiltzarren eta euria horma barneratzen jarraitzarren, hezetasun-maila areagotzea eragiten du.

LDB mintzak eta euri-uxagarria erabilera oinarritzen diren sistemak erantzun higrotermiko bikaina erakutsi dute, hala eta guztiz ere, kontuan hartu behar da ur-ihesa gertatzekotan, isolamenduko atzeko geruzan arazo bat gerta litekeela. Hau da, sistema honek euri-uxagarri gabeko sistemarekin lortuko lirateke emaitzak berdinak erakutsiko lituzke. Hau guztira gehitu behar zaio LDBren funtzionamendu egokia mintz arteko zigildu kalitatearen menpe dagoela. Bestela, ur-lurruna LDBen artean jarioko luke eta hezetasun gehigarri bat sortuko litzateke. Kontuan izan behar da IKAaren kasuan emaitza ona lortu bada ere, sistema hau LDB edo LAArekin batera erabiltzea kontrakoa izan litekeela, barrera bat litzatekeelako eta ez luketelako isolamenduaren kapilar funtzionamendu egokia baimenduko.

Arazo hori dela kausa, LAA materialen erabilera aproposa da mintz sistemetan oinarritzen diren BITS proposatzen bada. Emaitzen arabera, hezetasun-profila pixka bat handiagoa bada ere LDB-ren kasuarekin konparatuta, LAAk ur-ihesa bat gertatzekotan, hezetasun areagotze hori ez da emango lurrunezko iragazkortasun propietate aldakorrari esker.

Egur usteltze-ereduaren aplikazioa habearen mutur ebaluazio zehatza burutzeko metodo eraginkorra dela erakutsi du. Jatorrizko horma ez du egurraren usteltze arriskua jasaten; BITS soluzioak ezarritako hormetan, berriz, baldintza higrotermikoak aldatzeak egiturazko arriskuak sor ditzake. Kasu honetan, euri-uxagarri gardenaren aplikazioa erabiliko den isolamendu mota baino garrantzitsuagoa da egurrezko habearen funtzionamendua bermatzeko.

Beraz, emaitzen analisi orokorra aztertu ondoren, kapitulu honekin lortu diren ondorioak honako hauek dira:

- Ikus daitekeen bezala, ur uxagarririk gabe hiru BITS soluzioek jatorrizko horma baino hezetasun erlatibo handiagoa sortzen dute. Beraz, produktuaren erabilera isolamendu mota baino garrantzi handiagoa du eta horren ondorioz bere aplikazioa derrigorrezkoa bihurtzen da birgaitze energetikoak burutzerakoan.



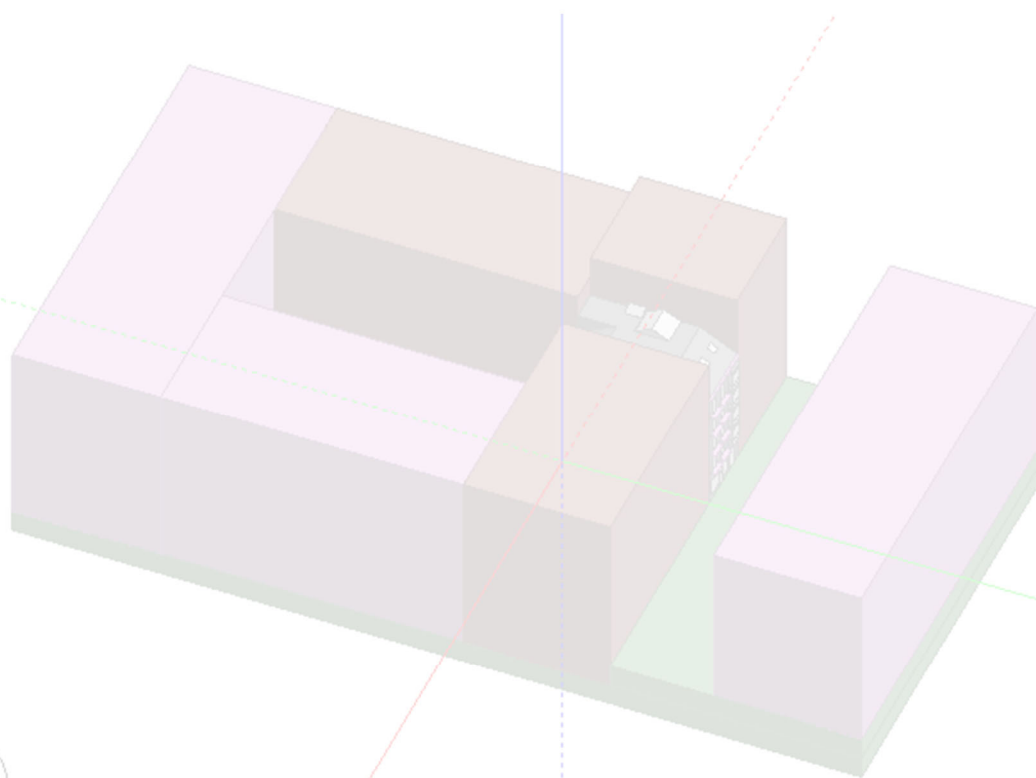
- Mintzen eta IKaren erabilera konbinatua kaltegarria da mintzek ez dutelako isolamenduak bere funtzionamendu kapilarra egin ondoren xurgatutako hezetasuna kanporatzea lagatzen mintzekin oztopo egiten duelako.
- EPS mintzekin erabilitako kasuak hoberenak badira ere, mintz gabeko kasuarekin alderatuta ez da lortzen nabarmen handiko hobekuntzarik.
- Mintzak MW isolamenduarekin ez diren kasuetan erantzun ona erakutsi badu ere, 1D emaitzen arabera gertu dago %95 mugara iristeko. Beraz, kontrolatu gabeko hezetasun iturri bat agertzekotan arrisku bat sor lezake. Horren ondorioz mintzen erabilera MW isolamenduarekin gomendagarria bihurtzen da.
- Egurrezko habe buruan isolamendu termikorik ez dagoenez, zeharkatzen duen bero fluxuaren ondorioz, hezetasun erlatiboa 1D kasuekin konparatuta baino txikiagoa da. Beraz 1D simulazioetan gomendagarritzat hartu diren kasuak seguruak dira habe buruan arriskua sor ez dadin.
- Ur-uxagarria ez erabiltzea saihestu egin behar da habeetan dakarren efektu suntsitzailegatik.

IV. Kapitulu

Capítulo IV

Birgaitze energetikoen
efektua eraikinen
berokuntza-eskarian

Efecto de la rehabilitación
energética en la demanda de
calefacción de los edificios



Laburpena:

Aurreko kapituluek eraikinen energiaren eskarian eragina nabaria duten parametro garrantzitsuenak detektatzeko eta kuantifikatzeko aukera eman dute. Kapitulu honetan eraikinetan posible diren hobekuntzen eragina aztertuko da erreferentzia-eraikin bat oinarri bezala hartuta eta energia simulazio kanpaina bat burutuz. Horretarako, optimizazio simulazio-eredua aplikatuko da, kostu-energiaren araberako oinarritutako soluzio optimoak detektatzeko.

Resumen:

Los capítulos anteriores han permitido detectar y cuantificar la posible dos de los parámetros más relevantes que afectan a la demanda de energética de los edificios. Este capítulo analiza el efecto de las posibles mejoras sobre los edificios en su conjunto tomando como base un edificio de referencia y realizando sobre el mismo una campaña de simulación energética. Para ello se aplicará el modelo de simulación de optimización que permitirá detectar aquellas soluciones óptimas en función de la relación coste-energía.

4.1. Sarrera

Eraikinen karakterizazio termikoa eta esku-hartze proposamenen azterketa zehatzak ezinbestekoak bihurtzen dira edozein birgaitze energetikotan. Hala ere, eraikinen azterketa energetiko orokorrak burutzen direnean hainbat faktore aldi berean kontuan hartu behar dira, hala nola, isolamendu termikoa, airearekiko estankotasuna, eraikinaren orientazioa edo inguruko eraikinek sortutako itzalak.

Efektu hau kontuan hartu ahal izateko, eraikinen simulazio energetikoa tresna ezin hobean bihurtzen da. Hauek, eraikinen hainbat ezaugarri kontsideratzea ahalbidetzen dute, beraz, era honetan eraikinen azterketa globala burutzea posible da.

Beste aldetik, kontuan izan behar da parametro bakoitzak ez duela eragin berdina eraikinen berokuntza-eskarian. Beraz, birgaitze energetikoetan esku-hartze mota bakoitza lehentasun desberdina izango du. Gainera, parametro bakoitzak lortzen duen energia kontsumoaren murrizketa efektua proportzionalki desberdin izan daiteke parametro bakoitzaren balioa aldatzen den heinean. Adibide bezala, isolamendu termikoaren lodiera 4 cm-tik 6 cm-ra lortzen duen berokuntza-eskariaren murrizketa proportzionalki altuagoa da 18cm-tik 20cm-ra handitzeak lortzen duen murrizketarekin konparatzen bada.



Honi gehitu behar zaio esku hartze bakoitzak kostu ekonomiko desberdina dakarrela. Hortaz, esku hartze bakoitza kostu bat badu eta proposamen bakoitza energi murrizketa desberdina lortzen duenez, proposatuko den birgaitze energetikoaren erabakia zailtzen da.

Hau da, inbertituko den diru kopuruaren arabera murrizketa energetiko bat lortuko da, baina izan liteke kostu zehatz baterako bi energi murrizketa desberdin lortu izatea. Beraz zentzuzko erabakia energia gehien murrizten duen kasua aukeratzea izango litzateke. Berdin gertatuko litzateke helburua alderantziz izango balitz. Ondorioz, kasu guztien emaitzak lortu ondoren eta bi helburu hauek kontuan izanda, inbertsioaren kostua eta energia murrizketa, posible izango litzateke kasu optimoak detektatzea eta horrela lehentasunezko helburuaren arabera birgaitze energetikorako proposatuko den esku-hartzea erabakitzea.

Beraz, birgaitze energetikoen azterketak sakonki burutu ahal izateko eraikinen simulazioa beharrezkoa bilakatzen da. Gainera, kontuan izan behar dira parametro guztien efektua eta horren ondorioz hautaketa optimoa egitea optimizazio azterketen bidez.

4.2. Helmena eta helburuak

Atal honen helburu nagusia ebaluatutako eraikin motan lortu daitekeen berotze-eskaeraren murrizketa potentziala zehaztea da birgaitze energetiko esku-hartze proposamen desberdinen bidez. Horretarako eraikinen simulazio energetikoen bitartez eta erreferentziako eraikin batean oinarrituta, simulazio kanpaina bat garatuko da esku-hartze aproposenak detektatu ahal izateko. Helburu hau kontuan hartuta, beharrezkoa da berokuntza-eskarian efektua duten parametro desberdinak ikertzea. Gainera, kontuan izan behar da berokuntza-eskaera helburu zehatz bat lortzeko hainbat konbinazio desberdin hautatu daitezkeela. Beraz, azterketarako optimizazioan oinarritutako simulazioa proposatzen da. Era honetan helburu bat baino gehiago kontuan hartzea posible da, hala nola, esku-hartzearen kostua, lortutako konforta edo karbono isuriak murriztea.

Hortaz, kapitulu honek hurrengo helburuak ezartzen ditu:

- 4.1. Helburua** Erreferentziako eraikin eredu bat garatzea II. kapituluan lortutako datuekin oinarrituta eta eraikinaren jatorrizko egoeraren berokuntza-eskaria aztertzea.
- 4.2. Helburua** Birgaitze energetiko proposamen bakoitzaren banakako efektua aztertzea simulazio ereduaren berokuntza-eskarian.

4.3. Helburua Birgaitze energetiko neurri desberdinen efektu konbinatua aztertzea simulazio ereduaren berokuntza eskarian.

4.4. Helburua Kostu-energia loturari dagokionez aztertutako ereduaren birgaitze energetiko esku-hartze optimoak detektatu.

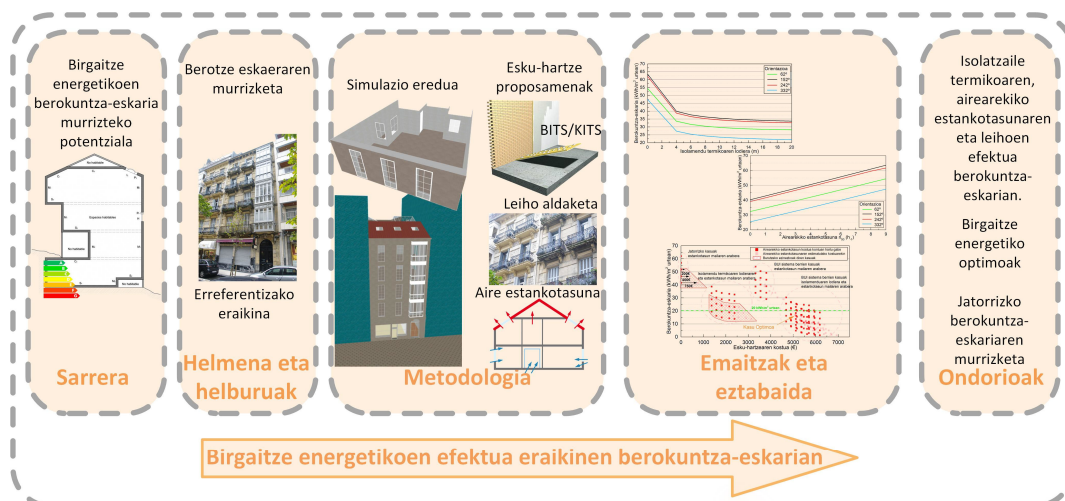
4.3. Metodologia

4.3.1. Kapituluaren egitura

Kapitulu honetan garatutako pausoak 4. 1. Irudian aurkezten dira. Helburu nagusia lortu ahal izateko, lehenik eta behin erreferentziako eraikin bat erabaki behar da ondoren simulazio eredu bezala balio dadin.

Era honetan esku-hartze mota ezberdinen efektua aztertuko da lehenengo ondorioak detektatzeko. Horretarako isolamendu termikoen lodiera, leiho mota batzuk eta airearekiko estankotasun maila desberdinak kontuan hartuko dira simulazio termikorako.

Hurrengo pausoa esku-hartzeen konbinazioa izango da kasu bakoitzeko kostua kontuan hartuta. Anlisi honen bitartez, optimizazio bat burutzea posible izango da esku hartze gomendagarrienak detektatzeko energia-kostu loturari dagokionez.



4. 1. Irudia- Kapitulu egituraren deskribapen grafikoa

Azkenik, kapituluaren ondorioekin jarraituko da eta optimizazio simulazio eredutik lortutako emaitzak esku-hartze optimoak detektatzea ahalbidetuko dute.

4.3.2. Simulazio ereduaren definizioa

Azterketa eremuan hainbat eraikin mota ezaugarri desberdinekin aurki daitezke. Aurkitu daiteken eraikin eredu mota zabalagatik erreferentziako eraikin bat hautatu



behar da oinarri bezala erabiltzeko eta horrela jatorrizko portaera energetikoa aztertzeko eta bero eskaria murriztu daitekeen potentziala kalkulatzeko.

Gainera, eraikinen beste ezaugarri batzuk asko mugatzen dute emaitzekin lortu daitezkeen ondorioak. Hau da, eraikinaren orientazioa, inguruko eraikinek sortzen dituzten itzalak erreferentziako eraikinean, eraikinaren aztertutako solairua (solairu tipoa, estalki azpiko solairua, soto solairua) eta ezaugarri gehiago oso desberdinak izan daitezke eraikin batetik bestera. Beraz ezaugarri guzti hauek kontuan hartu behar dira burutu behar den azterketan.

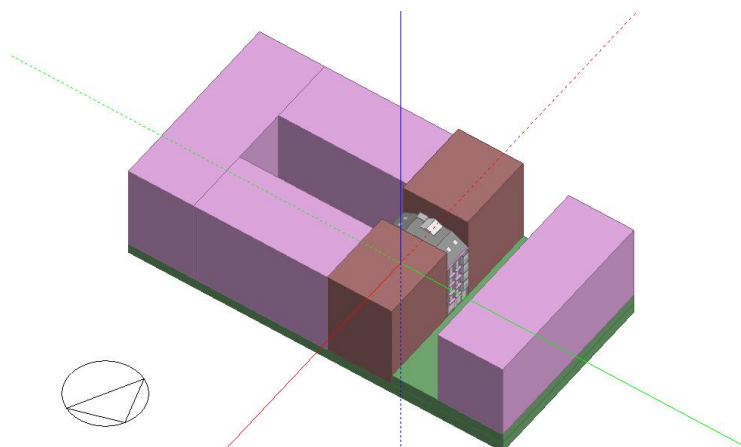
Erakinen simulazio ereduak kalkulatu metodologiak ahalbidetzen dute ezaugarri guzti hauek kontuan hartu ahal izatea. Hala ere, eraikinaren geometria bat garatzea ezinbestekoa bihurtzen da azterketa burutu ahal izateko. Horregatik azterketa eremuaren eraikin tipologia zabalenera bat hautatu da simulazioak garatzeko, horma bitarteko eraikin mota, 4. 2. Irudia. Beraz, azterketaren helmena eraikin mota honekin lortutako emaitzetan murrizten da, hau da beste eraikin motak hala nola izkinako eraikinak edo banakako eraikinak bere ezaugarri geometrikoak desberdinak direla eta ezin dute ikerketa honetan lortutako ondorio zehatz berak erabili. Hala ere, garatutako ikerketa metodoa eta ondorio orokorrak erabilgarri bihurtzen dira.



4. 2. Irudia- Aztertutako eremuaren horma bitarteko eraikin mota.

Eraikin mota honek inguruko eraikinen hormen artean kokatuta dago. Horren ondorioz, termikoki dagokionez, bero galerak murrizten dira alboko eraikinak erabiltzen ari badira, hau da inguratzaille termikoa azalera gutxiago du kanpoalderantz. Oro har, eraikinen simulazioetan ezaugarri hau adierazteko

azterketa eraikinaren alboko aldeak adiabatikoak bezala konfiguratzen dira. 4.3. Irudian erreferentziako eraikina erakusten da bere etxadi barruan. Alboko granate koloreko blokeak adiabatikoak dira, lila koloreko blokeak itzala sortzen duten eraikinak eta azkenik berde koloreko blokeak lurra adierazteko erabiltzen dira. 4.4. Irudiak garatutako simulazio ereduaren horma nagusia eta uharte-patioaren horma erakusten du.



4. 3. Irudia- Simulazio ereduaren ingurumena.



4. 4. Irudia- Azterketa kasuaren horma nagusia eta uharte-patio horma.

4.3.2.1. Ezaugarri konstruktiboak

Simulazio ereduaren erabili diren inguratzaile termikoaren ezaugarriak 4.1.Taulan adierazten dira. Bertan erabilitako materialen eroankortasun termikoa eta lodiera zehazten dira, hala nola, elementuaren kalkulaturako transmitantzia termikoa. Kanpoko (R_k) eta barrualdeko (R_b) azalerako erresistentzia termikoak ere zehazten dira elementuaren inklinazioaren eta bero fluxuaren noranzko arabera.



Aipatzekoa da erreferentzia hormarako kontuan hartu den ezaugarri termikoak II. kapituluaren kalkulaturako horma izan dela. Hau da, zubi termikoak kontuan hartzen duen kasua eta lodiera baxuena duena. Era honetan kasu txarrena kontuan hartu ahal izan da. Bere lodiera 0.40 metrokoa da eta transmisio termiko balorea $U = 2.48 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Beste aldetik eraikinaren ereduaren leiho geometria ugari daudenez, hautatu egin da leihoaren beira eta markoaren erabilitako eroankortasun termikoak eta lodiera besterik zehaztea. Erabilitako softwarea leihoaren geometriaren arabera kalkulatu du transmisio termikoa.

4.. 1. Taula- Jatorrizko ingurutzaileraren ezaugarri termikoak

Erreferentzia horma		
Materiala	$\lambda_{\text{baliokidea}}$ (W/mK)	Lodiera (m)
2 kapituluaren kalkulaturako horma kasua	1.716	0.40
$R_k = 0.040 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_b = 0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$		
U (W/m²K)		2.48

Estalki inklinatua		
Materiala	λ (W/mK)	Lodiera (m)
Zeramikazko teila	1.3	0.02
Aireztatutako aire kamera	0.23	0.02
Egurrezko taula	0.19	0.025
Aireztatutako aire kamera	1.05	0.10
Egurrezko taula	0.19	0.015
Luzitua	0.57	0.015
$R_k = 0.040 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_b = 0.10 \text{ m}^2\text{K/W}$		
U (W/m²K)		1.74

Estalki laua		
Materiala	λ (W/mK)	Lodiera (m)
Zeramikazko baldosa	1	0.015
Porlanezko morteroa	0.55	0.02
Xafla iragazgaitza	0.23	0.005
Egurrezko taula	0.19	0.025
Aireztatutako aire kamera	1.05	0.10
Egurrezko taula	0.19	0.015
Luzitua	0.57	0.015
$R_k = 0.040 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_b = 0.10 \text{ m}^2\text{K/W}$		
U (W/m²K)		1.83

Zolata		
Materiala	λ (W/mK)	Lodiera (m)
Zeramikazko baldosa	1	0.015
Porlanezko morteroa	0.55	0.05
Hormigoia	1.72	0.10
$R_k = 0.040 \text{ m}^2\text{K/W}$ $R_b = 0.17 \text{ m}^2\text{K/W}$		
U (W/m²K)		2.67

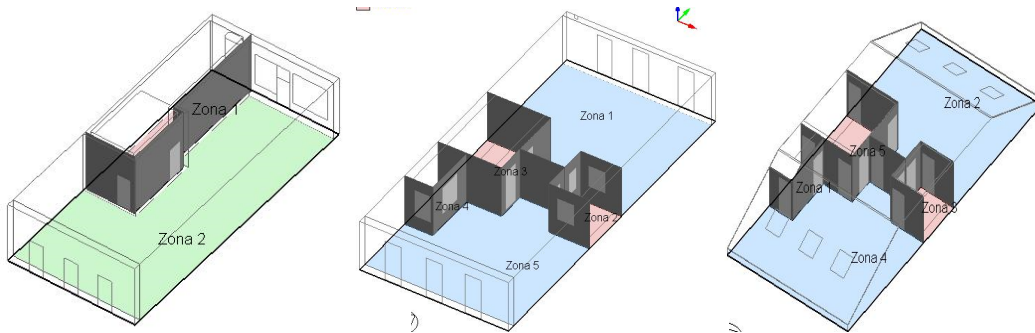
Leihoak		
Materiala	λ (W/mK)	Lodiera (m)
Egurrezko markoa	0.19	0.06
Beira sinplea	0.9	0.006
	U (W/m²K)	Geometria bakoitzaren arabera

Ingurutzailerik termikoaren beste ezaugarri nagusia aire estankotasuna da. Bere eragina eraikinaren bero eskarian handia da, beraz kontuan hartu behar den beste parametro termikoa da. Kasu honetan ere II. kapituluaren garatutako Blower Door Testekin lortutako emaitzetan oinarrituko da erabiliko den balioa. Saiakuntzetan emaitza zabala lortu direnez, batez besteko emaitza erabiltzea egokitzat hartu da, hau da $n_{50}=9.03h^{-1}$. Kontuan hartu behar den beste ezaugarri bat saiakuntzaren emaitza erreferentziako 50 Pa presio diferentzia hartzen dela, beraz n_{50} balioa presio diferentzia baldintza naturalerako kalkulatu egin behar da. Horretarako, metodo hedatuena Kronvall eta Persilyek garatu zutena da eta "rule-of-thumb" bezala ezagutzen da. Honek baldintza naturalerako gertatzen diren infiltrazioak kalkulatzeko hurrengo metodoa proposatzen du $n_{nat}=n_{50}/20$. II. kapituluaren 2.2. Taulan aipatu den bezala, hainbat eredu erabiltzeko eskuragarri daude. Hala ere, proposatutako eredu era sinpleago batean kontuan hartzen dituen baldintza naturalerako gertatzen diren infiltrazioak, beraz horren ondorioz eraikinaren simulaziorako eredu egokia da.

4.3.2.2. Aireztapen eta berokuntza sistemak

Eraikinaren bero baldintza termikoak eta Barruko Airearen Kalitatea mantentzeko instalakuntzen erabilera beharra du. Lehenik eta behin, barruko baldintzak ezarri behar dira eta horretarako Eraikuntzako Kode Teknikoak ezartzen dituen baldintzak erabiliko dira simulazio ereduaren.

Alde batetik eraikinenean hiru erabilera profil desberdinak daude, 4.5. Irudia, bizitegi erabilera, ez bizitegi erabilera eta erabilerarik ez duena. 4.2. Taula. Ikusi daitekeen bezala, bizitegi erabilera profilaren barruko tenperaturak ezartzen dira egunaren eta hilabetearen arabera, hala nola barruko kargak eta aireztapena. Hala ere, baldintza eredu honek ez du fideltasunik osoz aztertuko den eraikin tipologiaren benetako baldintzak adierazten. Kasu hauetan, orokorrean, ez dute etengabeko aireztapen sistemarik kasu gehienetan aireztapen naturala erabiltzen dutelako barruko aire baldintzak lortzeko. Beraz, simulazio eredurako ez da erabiliko aireztapen sistema mekanikorik.



4. 5. Irudia- Simulazio ereduaren erreferentziako solairuak eta erabilera profil mota (Gorria: erabilera Gabe, Berdea: Ez bizitegi erabilera, Urdina: Bizitegi erabilera)

4.2.Taula- Bizitegi erabilera profila Eraikuntzako Kode Tekniko arauaren arabera.

BIZITEGI ERABILERA	(24 ordu)				
	1-7	8	9-15	16-23	24
Goiko ezarpen temperatura (°C)					
Urtarrietik maiatzera	-	-	-	-	-
Ekainetik irailera	27	-	-	25	28
Urritik abendura	-	-	-	-	-
Beheko ezarpen temperatura (°C)					
Urtarrietik maiatzera	17	20	20	20	17
Ekainetik irailera	-	-	-	-	-
Urritik abendura	17	20	20	20	17
Karga sentikorra (W/m²)					
Lan egunak	2.15	0.54	0.54	1.08	2.15
Larunbata eta jaiegunak	2.15	2.15	2.15	2.15	2.15
Karga latentea (W/m²)					
Lan egunak	1.36	0.34	0.34	0.68	1.36
Larunbata eta jaiegunak	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36
Argiztapena (W/m²)					
Lan egunak, larunbata eta jaiegunak	0.44	1.32	1.32	1.32	2.2
Ekipameduak (W/m²)					
Lan egunak, larunbata eta jaiegunak	0.44	1.32	1.32	1.32	2.2
Udarako aireztapena					
Lan egunak, larunbata eta jaiegunak	4.00	4.00	*	*	*
Neguko aireztapena					
Lan egunak, larunbata eta jaiegunak	*	*	*	*	*

* Aireztapen tasa Eraikuntza Kode Teknikoaren DB HS arauaren arabera da.

Era berean, simulazio ereduaren behe solairua ez du bizitegi erabilera. Orokorrean dendak, tabernak edo bulegoak izaten dira, beraz erabilera jakin baten definizioaren faltagatik, erabilera orokor bat hautatu da. Erabilitako baldintzak 4.3.Taulan adierazten dira. Kasu honetan ere ez da aireztapen mekanikoen baldintzak kontuan hartu aireztapen naturala kontuan hartu delako. Azkenik eraikinaren ataria eta soto solairuak erabilera ez dutenez ez dira baldintza zehatz batzuk ezarri espazio hauetan.

Simulazio ereduaren helburua berokuntza eskaria murriztea denez, erabilitako instalakuntzak ez dago zehazteko beharrik azterketa eraikinen alde pasiboaren ebaluazioan oinarritzen baita.

4.3. Taula- Ez bizitegi erabilera profila Eraikuntzako Kode Tekniko arauaren arabera.

EZ BIZITEGI ERABILERA Karga ertaina	(12 ordu)		
	1-6 15-16 21-24	7-14	17-20
Goiko ezarpen tenperatura (°C)			
Lan egunak eta larunbata	-	25	25
Jai egunak	-	-	-
Beheko ezarpen tenperatura (°C)			
Lan egunak eta larunbata	-	20	20
Jai egunak	-	-	-
Karga sentikorra (W/m²)			
Lan egunak	0	6.00	6.00
Larunbata	0	6.00	0
Jaiegunak	0	0	0
Karga latentea (W/m²)			
Lan egunak	0	3.79	3.79
Larunbata	0	3.79	0
Jaiegunak	0	0	0
Argiztapena (W/m²)			
Lan egunak	0	100	100
Larunbata	0	100	0
Jaiegunak	0	0	0
Ekipameduak (W/m²)			
Lan egunak	0	4.50	4.50
Larunbata	0	4.50	0
Jaiegunak	0	0	0
Aireztapena (%)			
Lan egunak	0	100	100
Larunbata	0	100	0
Jaiegunak	0	0	0

4.4. Emaitzak eta eztabaida

4.4.1. Eraikinaren jatorrizko energia eraginkortasun egoeraren azterketa

Jatorrizko eraikinaren portaera energetikoa aztertu ahal izateko, eraikin osoaren simulazioa burutu da orientazioaren arabera. Emaitzak 4.4.Taulan erakusten dira. Oro har, orientazio guztietan berokuntza-eskarian ez dira desberdintasun nagusirik detektatzen. Balio hau eraikin osoaren batez bestekoa izan ondoren emaitzak oso antzekoak dira eta besterik 332°-ko eta 152°-ko artean eta 242°-ko eta 62°-ko artean harreman txikia ikus daitezke orientazio ardatz bera dutelako.

4.4.Taula- Jatorrizko eraikin ereduaren berokuntza-eskaria orientazioaren arabera.

Berokuntza-eskaria (kWh/m ² urtean)	Eraikinaren orientazioa			
	332°	242°	152°	62°
Eraikin osoa	55.78	58.09	55.84	56.46

4.4.2. Proposatutako esku-hartzeen banakako hobekuntza azterketa

Hurrengo atala kontuan hartu ditu birgaitze energetikoen bitartez hobetu daitezken parametroak eraikinaren bero eskaria murrizteko. Horretarako parametro



bakoitzaren efektua kalkulatu da portaera termiko orokorrean duen eragina detektatzeko eta lehendabiziko ondorioak lortu ahal izateko.

Simulazio kasu kopurua handia dela eta, azterketa eraikinaren erreferentziako etxebizitza batean oinarrituko da. Arestian kalkulatu den bezala, eraikin osoaren emaitzak aztertzen badira, orientazioaren aldaketak ez du eragin sakonik desberdintasunak bereizteko eraikin batez besteko emaitza aztertzen duelako. Beraz, ondorio zehatzagoak lortzeko esku-hartzeen bitartez lortzen diren emaitzak ikusi ahal izateko etxebizitzako emaitzak aztertzea ezinbestekoa bihurtzen da.

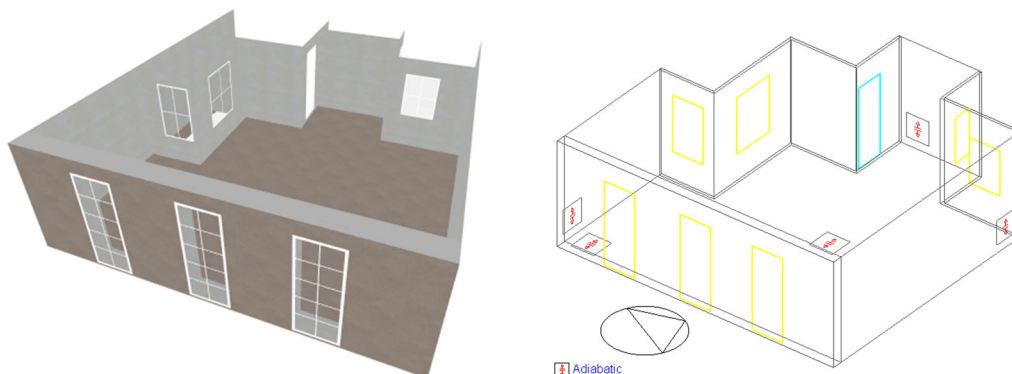
Horren ondorioz, eraikin osoaren erreferentziako etxebizitza bat hautatu da hurrengo azterketak burutzeko. Horretarako, 332º-ko orientazioko eraikin eredia adibide bezala hartuta, 4.5.Taulan eraikinaren unitate bakoitzaren berokuntza-eskaria ikus daiteke solairuaren arabera. Etxebizitzak lehen solairutik laugarrenera dira eta atikoak ere bizitegi erabilera dute. Beste aldetik, A motako unitateak, kale nagusira ematen dute eta bere hormak begiratoki bat dute. B motako unitateak uharte-patioko hormak dira eta balkoiak dute bakarrik.

4.5.Taula- 332º-ko orientazioko jatorrizko ereduaren unitateen berokuntza-eskaria.

<u>Berokuntza-eskaria (kWh/m² urtean)</u>	
Eraikin osoa	55.78
Sotoa	-
Ataria	-
Behe solairuko lokala	44.11
Lehen solairua A	59.18
Lehen solairua B	55.89
Bigarren solairua A	56.31
Bigarren solairua B	50.28
Hirugarren solairua A	56.60
Hirugarren solairua B	47.96
Laugarren solairua A	60.92
Laugarren solairua B	47.79
A Atikoa	75.31
B Atikoa	64.09

Emaitzetan nabari daitekeen bezala behe solairuko lokala, lehen solairua, laugarren solairua eta atikoak emaitza partikularrak dute unitate bakoitzak baldintza desberdinak dituelako. Hau da, atikoen esposizioa kanpoko baldintzetara handiagoa da, beraz bere eskaria ere altuagoa izango da. Horren ondorioz atikoaren eskariaren handitzeak eragina du ere laugarren solairuko unitateetan. Antezkoa eragina du beheko solairuak lehen solairuko unitateekin. Beraz, era honetan eta emaitzek erakusten duten bezala, bigarren eta hirugarren solairuko unitateak emaitza adierazgarriagoak dute. Horren ondorioz, hurrengo azterketak burutu ahal izateko hirugarren solairuko B unitatea hautatu da adibide bezala. 4. 6. Irudia- Erreferentziako etxebizitza unitatea. 4. 6. Irudian erreferentziako etxebizitzaren ereduaren ezaugarri

geometrikoak ikus daitezke, hala nola simulaziorako kontsideratu diren azalera adiabatikoak inguruko unitateen erabilera adierazteko.



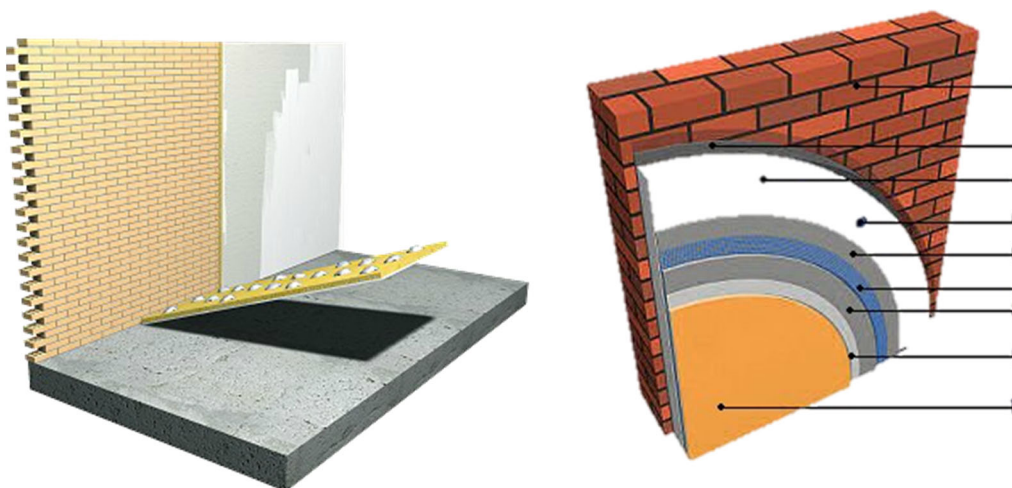
4. 6. Irudia- Erreferentziako etxebizitza unitatea.

4.4.2.1. Isolamendu termikoaren efektua

Isolamendu termikoa esku-hartze mota zabalenerarikoa da erakinen berokuntza-eskaria murrizteko. Hala ere, aipatu den bezala aztertutako kasuaren eraikin tipologian esku-hartze mota hauek murriztuta daude ondare arauengatik.

Horma nagusietan, itxura arkitektonikoa mantentzeko helburuarekin, kanpoko esku-hartzean mugatuta daude. Beraz, kasu hauetan BITS sistemak bakarrik aplikatu daitezke. Beste aldetik, uharte-patioko hormak, arauगतिक babes gabeko hormak direnez, KITS sistemak proposatu daitezke, 4.7.Irudia.

Lehenik eta behin, isolamendu termikoaren efektua detektatu ahal izateko, erreferentziako etxebizitzaren kalkulu parametrikotik bat burutu da. Horretarako, lehen aipatu bezala etxebizitzaren orientazioaz gain, isolamendu termikoaren lodiera ere aldakorra bezala konfiguratu da.



4. 7. Irudia- Proposatutako Barruko (BITS) eta Kanpoko (KITS) Isolamendu Termikoko Sistemak

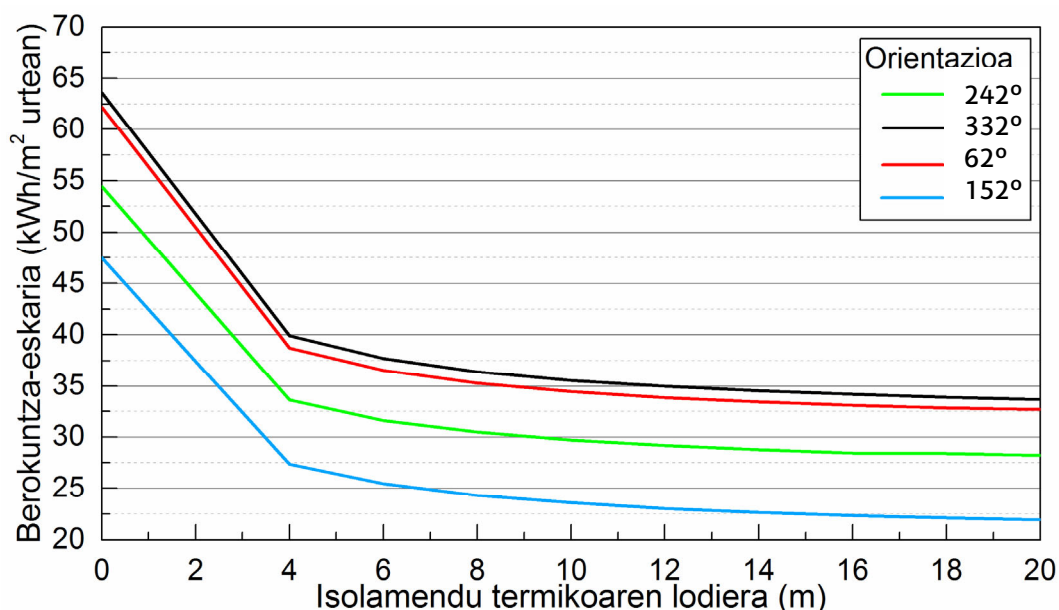


Kasu honetan, efektu orokorra adierazteko, erabilitako isolamendu termikoaren gutxieneko lodiera 4 zentimetrokoa izan da, eta maximoa 20 zentimetrokoa, kalkulurako urrats tarte 2 zentimetrokoa izanik. Beraz, jatorrizko egoera kontuan izanda, orientazio bakoitzerako 10 kasu kalkulatu dira eta horrela orientazio guztiak kontuan hartzen badira 40 kasu.

Simulazio ereduaren ez da bereizi barruko edo kanpoko isolamenduaren kokapena kalkuluentzako garrantzia isolamendu termikoaren lodieran eta ezaugarri termikoetan dagoelako. Beraz, irudi beratik lortu daitezke BITS edo KITSein lortutako emaitzak. Azterketa sakonago bat BITS erabileraren bitartez inertzia termikoan sortutako aldakuntza kontuan hartu beharko luke. Erabilitako isolamendu termikoaren eroankortasun termikoa $\lambda = 0.035 \text{ W/mK}$ izan da.

Lortutako emaitzak, 4.8. Irudia, erakusten dute nola isolamendu termikoaren lodiera handitu ahala etxebizitzaren berokuntza-eskaria murrizten dela. Aipatzekoa da nola 10-12 zentimetroko lodiera arte garrantzizko murrizketa lortzen dela. Hala ere, lodiera hauek baino handiagoak erabiltzen badira, berokuntza-eskaria ez du proportzionalki lehen bezalako murrizketa efekturik. Beraz, ondorioztatu daiteke 12 zentimetro lodiera arte isolamendu termikoko esku-hartzeak eraginkorrak direla, lodiera horretatik gora beste esku-hartze motak burutzea gomendagarriagoak izango lirateke.

Isolamendu termikoaren bitartez lortu daitekeen jatorrizko berokuntza-eskariaren murrizketa %37tik %53ra izan daiteke isolamendua lodieraren eta etxebizitzaren orientazioaren arabera.



4. 8. Irudia- Erreferentziako etxebizitzaren berokuntza-eskaria isolamendu termikoaren eta orientazioaren arabera.

4.4.2.2. **Leihoen ordezkapena**

Leihoen aldaketa orokorrean efektu doblea izaten dute eraikinaren energia kontsumoan. Alde batetik transmisio termikoaren eta emisibitatearen arabera bero galerak murriztu ditzakete. Beste aldetik, bere instalazioa eta leihoaren airearekiko iragazkortasuna egokia badira, eraikinaren airearekiko estankotasuna hobetu daiteke. Baina azkeneko portaera hau oso aldakorra izan daiteke eta horren ondorioz saiakuntzak egitea beharrezkoak dira ingurutzaitetik zeharkatzen duten aire ihesak neurtzeko. Beraz, printzipioz leihoen aldaketak duen efektua eraikinaren energia eskarian bakarrik transmisio termikoen arabera adierazi daiteke.

Leihoak eraikinaren berokuntza-eskarian duten efektua detektatu ahal izateko, jatorrizko leihoaz gain, leiho berriak aztertuko dira. Azterketa adierazgarri izateko, hautatutako leihoak, oro har merkatuak gehien erabiltzen direnak izango dira. Hau da, alde batetik Beira Unitate Isolatzaile (BUI) arrunta erabiliko da, 4mm-ko beirekin eta 16 mm-ko kamerarekin. Beste aldetik BUI berdina erabiliko da baina emisibitate baxukoa. Azkenik errendimendu altuko BUI aztertuko da, normalean etxe pasiboetan erabiltzen direnak, hiru beirazkoak, horietako bi emisibitatea baxukoak, eta aire kamera bikoitzekoa. Erabilitako BUI berrien eta jatorrizko beiraren ezaugarri termikoak 4.6.Taulan adierazten dira.

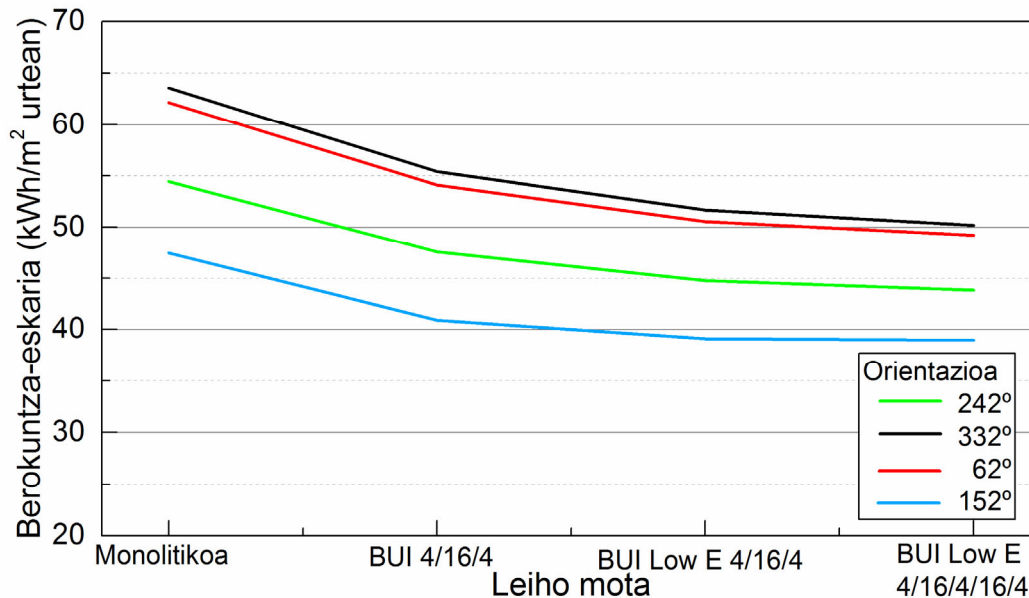
4.6.Taula- Simulazio eredurako BUI eta jatorrizko beiraren ezaugarri termikoak.

Beira mota	Dimentsioak (mm)	Transmisio termikoa, U_g (W/m ² K)	Eguzki faktorea g (-)
Jatorrizko beira	6	5.71	0.819
BUI sinplea	4/16/4	2.72	0.77
Emisibitate baxuko BUI	4/16/4	1.37	0.629
Emisibitate baxuko BUI eta hiru beirazkoa	4/16/4/16/4	0.80	0.53

Emaitzak 4.9.Irudian adierazten dira etxebizitzaren orientazioaren arabera. Oro har, leihoekin lortutako emaitzen profila oso antzekoa da isolamendu termikoekin lortu diren emaitzekin alderatuta. Hau da, transmisio termiko baxuagoko BUI erabiltzen den neurrian lortutako berokuntza-eskaria gehiago murrizten da. Baina murrizketa honen jaitsieraren portzentaia aurreko erabilitako BUI- arekin alderatuta txikiagoa da. Beraz, etxebizitza zenbat eta eraginkorragoa lortu nahian, proportzionalki orduan eta zailagoa izango da helburua lortzea.

Emaitzen azterketa zehatzagoa egiten bada adieraztekoa da beti transmisio termiko txikiago erabiltzen denean berokuntza-eskaria murriztea lortzen dela; alabaina, 152° orientazioa duen kasua beira hirukoitza erabiltzen denean ia ez dago hobekuntzarik. Kasu honetan, hego-ekialdeko orientazioa edukitzearen ondorioz, beira

hirukoitzarekin lortzen den bero galeren murrizketa eguzkitik lortzen den erradiazio energia murrizketarekin orekatzen da. BUI mota honen eguzki faktorea txikiagoa da, beraz energia lortzeko posibilitate txikiagoa du emisibitate baxuko beira bikoitza kasuarekin alderatzen bada. Bi kasu hauen desberdintasuna berokuntza-eskarian soilik %0.4 da.



4. 9. Irudia- Erreferentziako etxebizitzaren berokuntza-eskaria leiho motaren eta orientazioaren arabera. Etxebizitzaren leiho guztiak aldatuz.

Azterketa honen bidez eta alderdi energetikoa soilik kontuan hartuta, leihoen efektua nabarmenekoa da. Posible da jatorrizko berokuntza-eskaria %12tik %21era murriztea merkatuan ohikoak diren BUI erabilia. Beste aspektu garrantzitsua izan da ezaugarri teknikoko BUI sistemak hobekak erabili arren, lortutako berokuntza-eskariaren murrizketa oso nabarmena lortu ez izatea orientazioa dela eta.

4.4.2.3. Airearekiko estankotasunaren efektua

Aire estankotasunaren maila hobetzen denean, nahigabeko aire ihesak saihesten dira. Beraz, behar den energi kopurua aire berri hotza berriz berotzeko murrizten da. Horretarako, merkatuan hainbat produktuak daude eraikinen estankotasuna hobetzeko, hala nola, mintz bereziak, zintak, impregnazio likidoak, poliuretano aparra, zinta aurre-konprimituak etab, 4.10.Irudia.

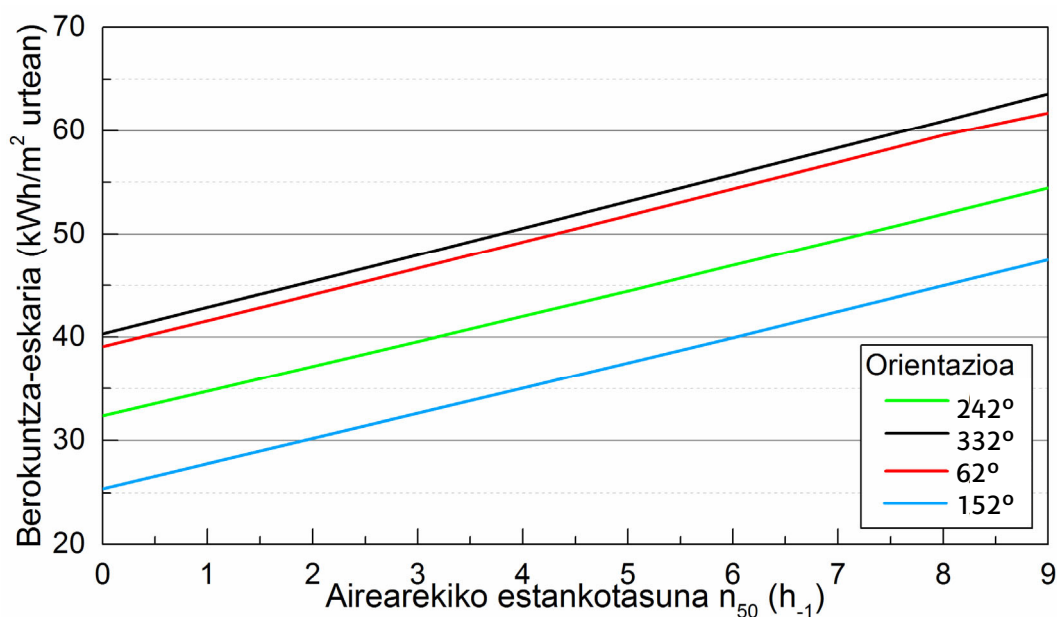


4. 10. Irudia- Airearekiko estankotasuna hobetzeko produktu adibideak (Iturria: Pro Clima).

Produktuen erabileraren arabera eraikinen estankotasun maila jakitea ezinezkoa denez, ezin da simulazio eredu maila zehatz batzuk ezartzea. Horren ondorioz, erabaki da simulazio tarteak estankotasunaren arabera $9 \text{ h}^{-1} \geq n_{50} \geq 0 \text{ h}^{-1}$ eta 1 h^{-1} ko urratsak erabiliko dira.

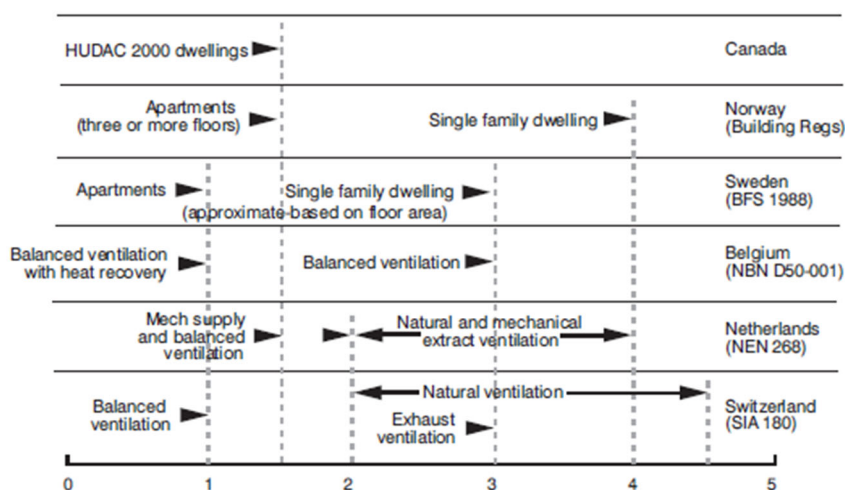
Kasu honetan, lortutako emaitzak 4.11.Irudia, isolamendu termikoen emaitzekin alderatuta, guztiz linealak dira. Hau da, zenbat eta airearekiko estankotasun gehiago izan etxebizitzak orduan eta berokuntza-eskaria txikiago lortzen da. Beraz, airearekiko estankotasuna hobetu nahian ahalik eta emaitzarik hoberena lortzea helburu bihurtzen da.

Kontuan izan behar da, airearekiko estankotasuna etxebizitzaren aireztapen sistemarekin batera kontuan hartu behar dela. Hau horrela ez bada etxebizitzaren barruko baldintzak onartezinak izango lirateke aireztapen falta egongo litzatekeelako. Orokorrean, aireztapen sistema mekanikoa erabiltzen ez bada, airearekiko estankotasuna n_{50} maila batetik baino gutxiago lortzea ez da gomendagarria. Hau da, infiltrazioak ez lirateke izango nahikoak era natural batean etxearen aireztapen beharrak asetzeko. Horren ondorioz, hainbat herrialdek aspektu honen inguruan araudia garatu dute, 4.12.Irudia, eta muga hau $n_{50}=4.5 \text{ h}^{-1}$ eta $n_{50}=2 \text{ h}^{-1}$ balioen artean ezartzen dute. Balio tarte hauen ondorioz, ikerketa honetan $n_{50}=3 \text{ h}^{-1}$ muga balioa erreferentzia bezala kontuan hartuko da, hau da airearekiko estankotasun maila hobetu nahian, aireztapen sistema mekanikoen instalakuntza beharrezkoa bihurtuko litzateke.



4. 11. Irudia- Erreferentziako etxebizitzaren berokuntza-eskaria airearikiko estankotasuna eta orientazioaren arabera.

Emaitzei dagokionez, argi ikusi daiteke aire estankotasunaren eta berokuntza-eskariaren arteko erlazioa. Hau da, estankotasuna maila $n_{50}=1 h^{-1}$ murriztu ahala berokuntza-eskariaren 2.1-2.6 kWh/m² urtean arteko murrizketa lortzen da. Beraz, aireztapen sistematik ez instalatzearen $n_{50}=3 h^{-1}$ -ko muga kontuan izanda, airearekiko estankotasuna hobetzen bada jatorrizko berokuntza eskaria %24tik %31ko murrizketa lortu daiteke. Azkenik, aireztapen sistema instalatzekotan, lortu daitekeen murrizketa maximoa, hau da aire-ihesik gabe, %36tik %46ra da.



4. 12. Irudia- Herrialdeen aireztapen sistema moten araudia airearekiko estankotasunaren arabera [1].

4.4.3. Eraikitako ondarearen birgaitze energetikoen esku-hartzeko konbinatuen optimizazio ereduak

Hurrengo atala arestian proposatu diren esku-hartzeen azterketa konbinatua garatuko da proposamen bakoitzaren kostua kontuan izanda. Horrela birgaitze energetiko aproposak detektatu ahal izango dira kasu bakoitzean ezarritako helburuaren arabera.

Horretarako, alde batetik Cypek eskuragarri duen "Generador de precios" datu-basea kontuan hartuko da esku hartzeen kostua kuantifikatu ahal izateko. 8.3. Eranskinean kontsultatu daitezke erabilitako esku-hartzeen ezaugarri zehatzak eta 4.7.Taulan optimizazio eredurako erabili diren esku hartzeen kostuak. Isolamendu termikoen eta leihoen kasuan kostu guztia kalkulatzeko instalatutako metro karratuen arabera izan da. Hala ere, airearekiko estankotasuna kuantifikatzeko prozedura desberdina jarraitu da.

Alde batetik, jatorrizko estankotasuna kontuan hartuta $n_{50} = 9 \text{ h}^{-1}$, $n_{50} = 7 \text{ h}^{-1}$ baliora iristeko ez da gehitu kosturik esku-hartze sinple batekin zeharbidez erraz lortuko litzatekeelako. Hau da, adibide bezala, leiho berriak instalatzean airearekiko iragazkortasun txikiago dutenez (leiho berak duen iragazkortasun erresistentzia, ez leihoaren instalakuntzarekin lortzen den estankotasun hobekuntza) edo isolatzaile termikoa jartzen denean, hormen juntura berriak burutzen direnez, aire filtrazioak murriztea lortzen da.

Beste aldetik hurrengo estankotasun mailak kostu zehatz bat gehitu zaie lortutako hobekuntzaren arabera. $n_{50} = 5 \text{ h}^{-1}$ maila oso eraginkor ez izan arren, instalakuntza aldetik xehetasun minimoa behar du. Oro har, leihoaren perimetroan instalakuntzan airearekiko erresistentzia eskaintzen duen ohiko material bat erabiltzen bada (poliuretano aparra adibidez) estankotasun hori lortu daiteke. Maila hau $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ arte hobetzeko, material bereziak erabiliz lortu daiteke, hala nola zinta aurre konprimituak, leihoen perimetroa zigilatzeke zintak, instalakuntzen kableak pasatzeko elementu itsasgarriak etab. 8.3. Eranskinean erantsi diren materialen aurrekontuen arabera estimatu dira airearekiko estankotasuna hobetzeko kostuak. Azkenik, erabilitako azken maila $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ eraginkortasun altuko eraikinetan soilik lortu daiteke. Horretarako, material bereziak erabiliz gain azterketa bereziak burutu behar dira (Blower Door Test, termografia etab), beraz kostuaren handitzea proba hauek burutzeko beharrezatik da. Beste aldetik, II. kapituluaren lortutako ondorioen arabera, $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ inguruko emaitzak birgaitze orokorra egin diren eraikinetan, hau da barruko egitura ere aldatu dutenak, soilik detektatu dira. Hala ere, airearekiko estankotasun balio honekin lortu litezkeen emaitzak ere kontuan hartuko dira.



Aipatzekoa da kasu honetan helburua esku-hartze desberdinen arteko konparaketa dela. Beraz, kostuan ez dira kontuan hartu birgaitze energetikorakoen beste partida edo kostu osagarriak, hala nola, aldamiok, proiektuaren garapen kostua, obralizentzia etab.

Simulazio eredurako 3 esku hartze mota erabili dira, bakoitzak 6, 4 eta 5 posibilitate desberdinekin, beraz 120 simulazio eredu desberdin dira eta 4 orientazioetan simulazioak burutuko direla kontuan izanda, guztira 480 kasu kalkulatu dira.

4.7.Taula- Optimizazio eredurako proposatutako esku-hartzeen kostua.

Esku-hartze mota	Esku-hartzearen proposamen zehatza	Kostua
Ingurutzailer termikoaren isolamendua	Jatorrizko horma	0 €
	4 cm	62.06 €/m ²
	8 cm	71.70 €/m ²
	12 cm	82.60 €/m ²
	16 cm	97.93 €/m ²
Leihoak	20 cm	108.46 €/m ²
	Jatorrizko leihoak	0 €/m ²
	BUI 4/16/4	425.62 €/m ²
	BUI Low E 4/16/4	454.06 €/m ²
Airearekiko estankotasuna	BUI Low E 4/16/4/16/4	487.34 €/m ²
	Jatorrizko estankotasuna $n_{50}=9\text{ h}^{-1}$	0 €
	$n_{50}=7\text{ h}^{-1}$	0 €
	$n_{50}=5\text{ h}^{-1}$	200 €
	$n_{50}=3\text{ h}^{-1}$	400 €
	$n_{50}=1\text{ h}^{-1}$	750 €

Optimizazio simulazioen emaitzak etxebizitzaren orientazioaren arabera 4.13.Iruditik 4.16.Irudira erakusten dira.

Emaitzen deskribapen orokorra burutu ahal izateko 4.13.Irudia oinarri bezala erabiliko da eta 4.8., 4.9. eta 4.11.Irudietan lortutako emaitzen profilak kontuan ere hartuko dira.

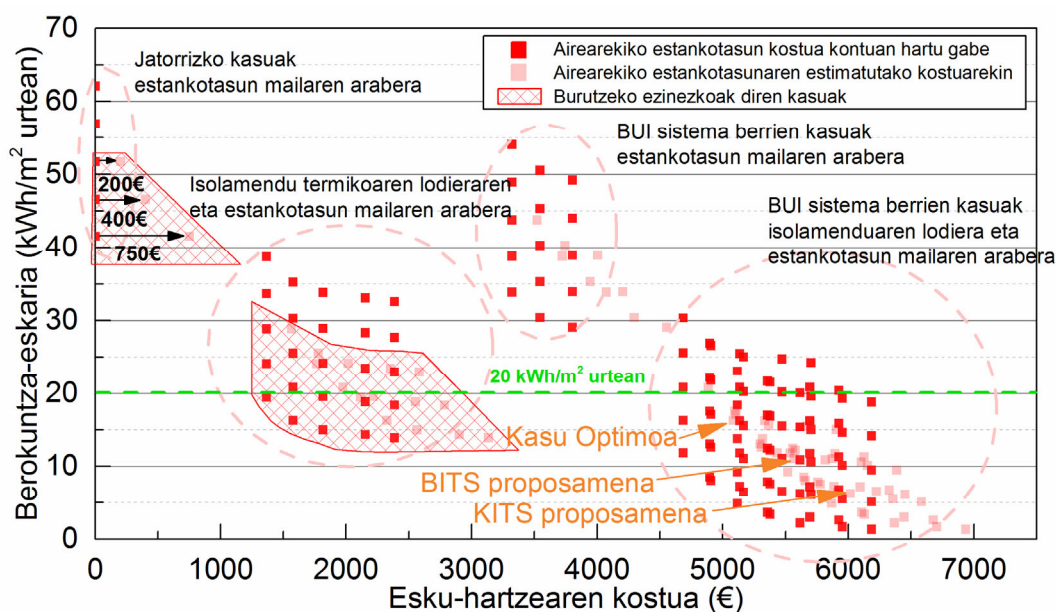
Lehenik eta behin, emaitzak garbiago deskribatu ahal izateko $n_{50}=5\text{ h}^{-1}$, $n_{50}=3\text{ h}^{-1}$ eta $n_{50}=1\text{ h}^{-1}$ bere kostu gehigarriarekin eta kostu hau gabe irudikatu dira emaitzen profil orokorra errazagoa ikustea ahalbidetzen duelako. Horren ondorioz, ezkerreko aldean adierazi dira airearekiko estankotasun kostu gehigarria (200, 400 eta 750€) maila bakoitzerako. Beste aldetik, kontsideratu da badaudela kasu batzuk ezinezkoak direla gauzatu daitezten. Adibide bezala, ezinezkoa izango litzateke estankotasun maila altua lortzea burutzen den esku-hartzea bakarrik isolatzaile termikoaren instalakuntza kontuan hartzen badu eta jatorrizko leihoak mantentzen baditu. Hauek ez badira aldatzen, airearekiko estankotasun maila txikia mantentzea eramaten dute. Berdina gertatuko litzateke isolatzaile termikoa instalatzen ez den kasuetan. Beraz, kasu hauek marradun itzal batekin adierazi dira.

Emaitzak lau taldetan sailkatzen dira. Lehengoa ezkerreko aldean kokatuta dago marradun elipse batekin adierazita eta 5 kasu osatzen dute. Kasu hauek, arestian aipatu den bezala, jatorrizko kasuak izango litzateke, hau da esku-hartze motarik gabe. Bakarrik estankotasun mailaren arabera bereizi dira eta horren ondorioz berokuntza eskariaren desberdintasunak sortzen dira.

Bigarren taldea, aurreko taldearen eskuinean dago eta zirkulu marradun batekin markatuta dago. Kasu hauek isolamendu termikoa gehitu diren kasuak dira eta estankotasun mailaren arabera ere sailkatuta daude. 4.8. Irudian detektatu den bezala, garbi ikusten da profilak lerro zuzen batera hurbiltzeko duen joera 12 cm-ko isolamenduaren lodieratik aurrera.

Hirugarren taldea leihoak soilik ordezkatzeko diren esku-hartzeen kasuak jasotzen ditu. Bereizten den bezala, hiru zutabeaz osatuta dago, bakoitzak leiho mota batekin dagokio: BUI sinplea, emisibitate baxuko bikoitzeko beira eta beira hirukoitza.

Azkeneko taldea, eskuineko aldean kokatuta dagoena, leihoen ordezkapena eta isolatzaile termikoaren instalakuntza aldi berean burutzen diren kasuak jasotzen ditu. Hauek berokuntza-eskariaren murrizketa altuena lortzen dute eta aldi berean inbertsio altuena behar duten kasuak dira. Talde honetan zailagoa da bereiztea portaera eredu bat kasu kopuru asko kontzentratu direlako eremu berean. Hala ere eredu hau bigarren eta hirugarren taldeko forma jarraitzen du.



4. 13. Irudia- 62°-ko orientazioa duen erreferentziako etxebizitzaren optimizazio simulazioaren emaitzak.

Taldean sailkapena burutu ondoren, optimizazio simulazioaren emaitza guztien kasu optimoa erabakitzeko lehenik eta behin zein den helburu nagusia eta horren balioa ezartzea beharrezkoa da. Birgaitze energetikoen helburua energia murrizketa denez

berokuntza-eskaria helburu bezala markatuko da. Beste aldetik, adibide gisa Passivhaus estandarra EnerPHit ziurtagiriarekin [2] birgaitze energetikoentzat markatzen duen helburua ezarri daiteke, hau da azterketa kasuaren klima zonarentzat 20 kWh/m² urtean, 4.8.Taula.

4.8.Taula- Berokuntza-eskariaren helburua EnerPHit ziurtagiria betetzeko klima zonaren arabera [2].

Zona climática de acuerdo al PHPP	Calefacción	Refrigeración
	Demanda de calefacción máxima [kWh/(m ² a)]	Demanda de refrigeración + deshumidificación máxima [kWh/(m ² a)]
Polar	35	igual al requerimiento para Casa Pasiva
Frío	30	
Frío - templado	25	
Cálido - templado	20	
Cálido	15	
Caluroso	-	
Muy caluroso	-	

Ondoren, helburu nagusia ezarri eta gero kasu optimoa detektatzeko fasea da. 4.13. Irudiaren adibidean, 20 kWh/m² urtean helburu nagusia lerro marradun batekin markatu egin da. Lerro honen azpitik dauden kasuak guztiak beteko lukete ezarritako helburua, baina kostuaren bigarren helburua garbi zehazten du soilik kasu bat beteko lukeela ezarritako beharra, hau da, birgaitze energetiko optimoa izatea kostu-energia loturari dagokionez.

Kasu optimo honen ezaugarriak hurrengoak dira: 4 cm-ko isolamendu termikoa, BUI sinplea eta $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$. Adibide honen beharrezko inbertsioa 5082.48 € izango litzateke eta berokuntza-eskaria 16.34 kWh/m² urtean izatea lortuko luke, hau da jatorrizko eskaria %73.7 murriztuko luke.

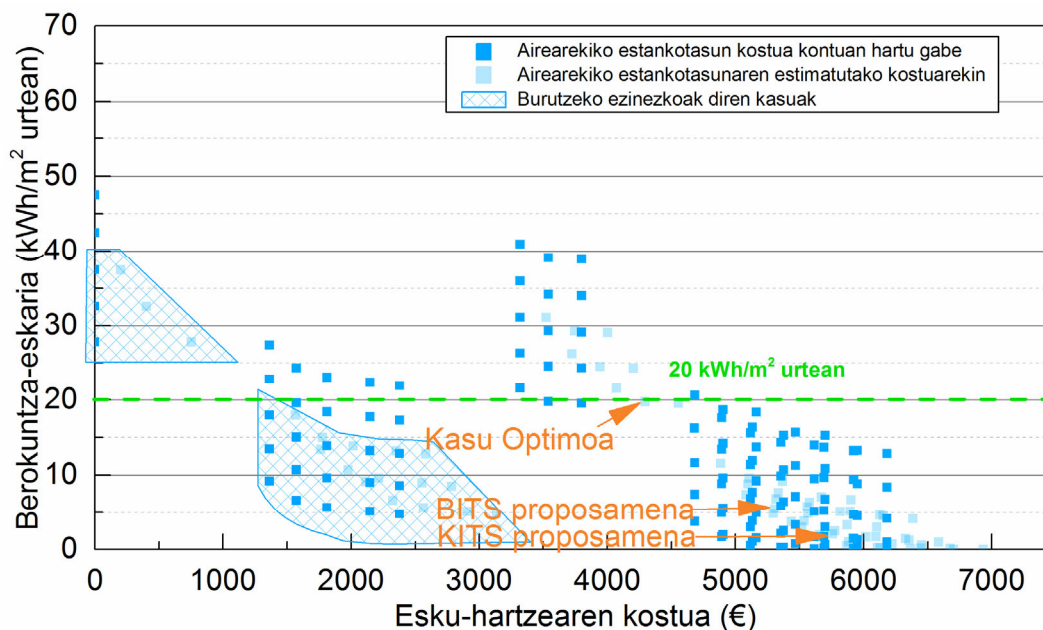
Aipatzekoa da murrizketa hau handiago izan litekeela, baino birgaitze energetikoa burutzeko zailtasuna ere areagotu litzateke. Hau da, alde batetik, estankotasun maila $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ balioa murriztu nahian, estankotasun saiakuntzak egiteaz gain, aireztapen naturalarekin bakarrik gomendatzen den muga gainditzen denez sistema mekanikoen instalakuntza beharra sortzen da. Beraz, esku-hartze mota hauen birgaitze energetikoa garestiago bihurtzen da. Honek azterketa sakonagoa beharko luke eta tesiaren helburua inguratzaile termikoen esku-hartzeak bakarrik helburu bezala duenez, sistema aktiboen ikerketa beste azterketa beharko luke. Hala ere, esku-hartze mota hauen estimazioa, etxe bakoitzeko 2000-3000 € inguruko gehikuntza izango litzateke, bero berreskurapeneko aireztapen mekaniko sistemaren instalakuntza dela eta. Beraz kasu hauek, irudian eskuinago kokatuko lirateke eta

kasu optimotik urrunduko lirateke. Alderdi energetiko-kostutik ikusita ez lirateke izango gomendagarriak, hauek alderdi energetiko-konfortatik ikusi beharko lirateke. Sistema hauekin BAKaren maila nabarmenki hobetzen da eta era iraunkor batera mantentzea lortzen da. Beraz kasu hauen ikerketa burutu ahal izateko, aztertutako helburu nagusia aldatu beharko luke.

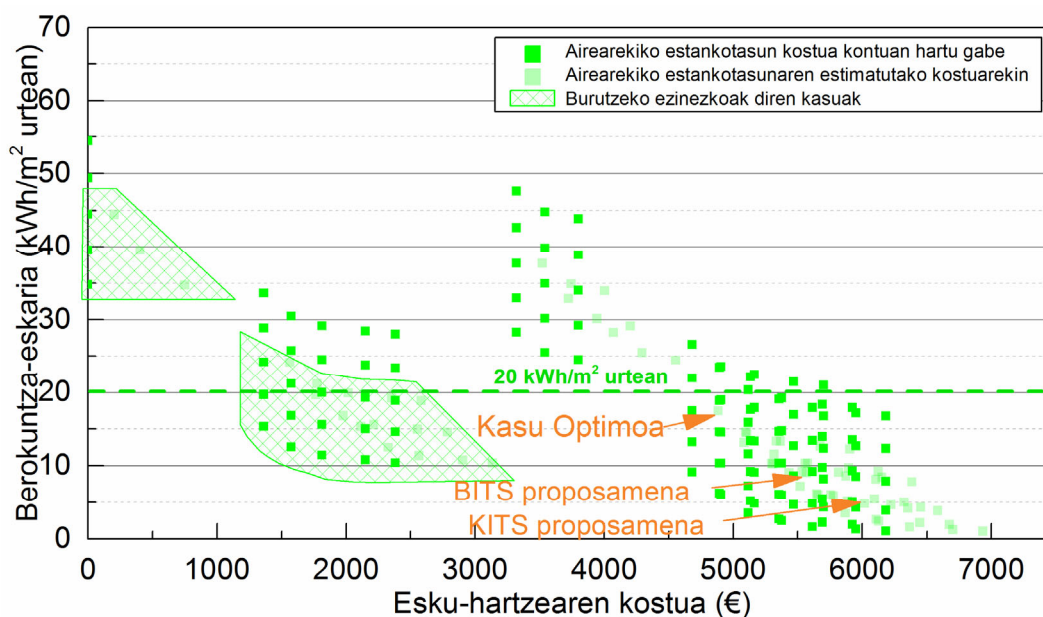
Beste aldetik, isolatzaile termikoaren lodiera handituz, berokuntza-eskaria ere murriztea lortuko litzateke. Kontuan hartu beharko liratekeen aspektuak, alde batetik arestian aipatutako profilak lerro zuzen baten hartzen duen joera eta beraz 12 cm-tik berokuntza eskaria ez dela nabarmenki hobetzen. Eta beste aldetik, esku-hartzea horma nagusietan bada barrualdetik burutu beharko litzateke BITS batekin, beraz isolamendu termikoaren lodiera barneko erabilgarritasun azalaren galerara mugatzen da. Beraz aspektu honek etxearen jabearen araberakoa da.

Leihoen efektuari dagokionez, leihoen esku-hartzea bakarrik burutu diren kasuetan 4.9.Irudian lortutako profil bera bereiz daiteke. Hau da, berokuntza-eskariaren murrizketa errendimendu handiko BUI instalatzen diren neurrian.

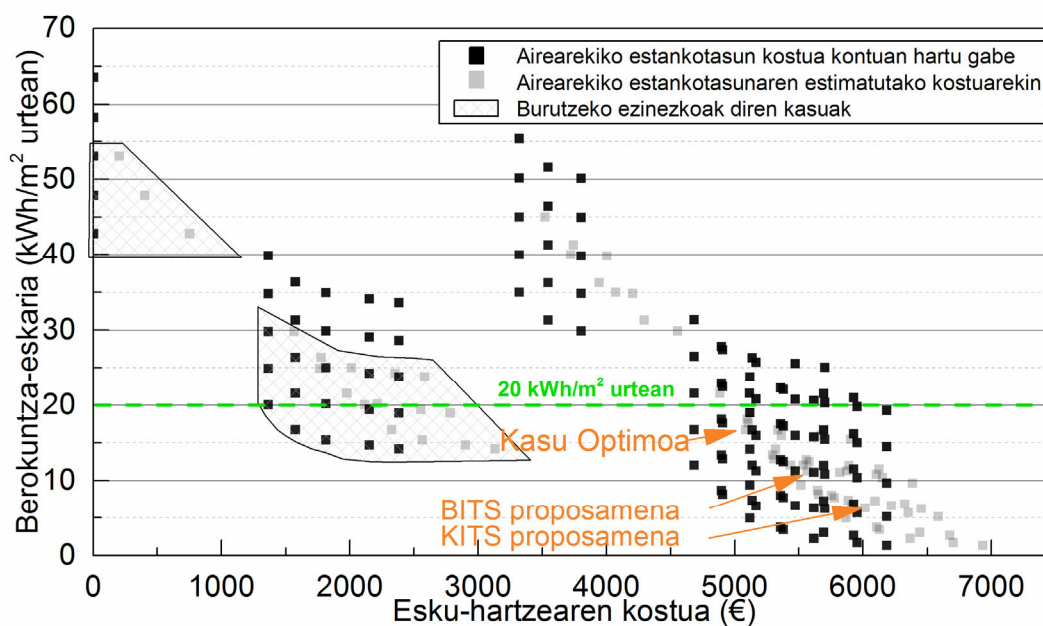
Emaitzen deskribapen orokorra azertu ondoren, airearekiko estankotasunaren estimatutako kostua kontuan hartzen dituzten kasuak aztertzeko beharra dagoela jakinda eta burutzeko ezinezkoak diren kasuak baztertuta (marradun itzalaren barruan), ondoren orientazio bakoitzeko lortu diren kasu optimoak 4.9.Taulan aurkezten dira.



4. 14. Irudia- 152^o-ko orientazioa duen erreferentziako etxebizitzaren optimizazio simulazioaren emaitzak.



4. 15. Irudia- 242°-ko orientazioa duen erreferentziako etxebizitzaren optimizazio simulazioaren emaitzak.



4. 16. Irudia- 332°-ko orientazioa duen erreferentziako etxebizitzaren optimizazio simulazioaren emaitzak.

Lortutako kasu optimoei dagokionez, adierazi daiteke hegoalderantz orientatutako ez dauden kasuek esku-hartze bera eman dutela. Hauek 4 cm-ko isolamenduarekin, BUI isolatzaile arrunta eta $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ esku-hartzeen beharra eman dute. Beste aldetik, hurrengo bi kasuek, hegoalderantz orientazioa txikia dutenak, energia murrizteko efektu txikiago duten esku-hartzea eman dute. 152° kasua isolamendu gabekoa baina $n_{50} = 1 \text{ h}^{-1}$ eta 242°-ko kasua 4 cm-ko isolamendu termikoarekin eta $n_{50} = 5 \text{ h}^{-1}$. Ikusi daitekeen bezala, lortutako berokuntza-eskarien murrizketa orientazioaren arabera %58.40tik - %73.60raino da.

4.9.Taula- Optimizazio simulazioetan lortutako esku-hartze kasu optimoak.

Orientazioa (°)	Inbertsioaren kostua (€)	Berokuntza-eskaria (kWh/m ² urtean)	Jatorrizko berokuntza-eskariaren murrizketa (%)	Horma	Beira	Airearekiko estankotasuna n ₅₀ (h ⁻¹)
242	4882.48	17.50	67.85	4 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4	5
332	5082.48	16.78	73.60	4 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4	3
62	5082.48	16.34	73.71	4 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4	3
152	4291.66	19.75	58.40	Jatorrizko horma	BUI 4/16/4 emisibitate baxukoa	1

Arestiko kasuak esku-hartze optimoak izan arren, bi aspektu zehatzak kasu hauek zailak bihurtzen dute burutzeko. Alde batetik, aipatu den bezala kasu bat airearekiko estankotasuna n₅₀= 1 h⁻¹ izan da, beraz aireztapen mekanikoaren beharra beharko luke. Horren ondorioz ikerketa honen helburua kontuan izanda kasu hau baztertuko litzateke. Eta beste aldetik, lan mota hauek bizitegi eraikinetan burutzen direnez, esku hartzeak ahalik eta antzekoak izan beharko lirateke. Beraz isolamendu termikorik ez duen kasua ere baztertuko litzateke.

Horren ondorioz, bi esku-hartzeen talde desberdin proposatzen dira. Alde batetik babesik gabeko hormentzako KITSen bitartez, 4.10.Taula, eta beste aldetik horma nagusietan esku hartzeak burutu ahal izateko BITSen bitartez, 4.11.Taula.

4.10. Taula- Optimizazio simulazioetatik proposatutako esku-hartzeak KITS sistemen bidez.

Orientazioa (°)	Inbertsioaren kostua (€)	Berokuntza-eskaria (kWh/m ² urtean)	Jatorrizko berokuntza-eskariaren murrizketa (%)	Horma	Beira	Airearekiko estankotasuna n ₅₀ (h ⁻¹)
242	6014.90	4.83	91.12	12 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4/16/4	3
332	6014.90	6.40	89.93	12 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4/16/4	3
62	6014.90	6.30	89.86	12 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4/16/4	3
152	5755.31	2.13	95.51	12 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4 emisibitate baxukoa	3

KITSen kasuan kontuan izan den irizpidea 4.. 8. Irudiaren bitartez lortutako ondorioan oinarritzen da. Kasu hauetan kanpoko isolamendua instalatuko denez, 12cm-ko isolamendua proposatzen da, lodiera hau baino gehiago erabiltzen bada ez delako lortzen hobekuntza nabarmenik. BITSen kasuan 4 cm-ko lodiera proposatzen da horrela ez delako barruko azalera erabilgarri asko galtzen eta gainera bat datorrelako kasu optimoetan lortutako emaitzekin.



4.11. Taula- Optimizazio simulazioetatik proposatutako esku-hartzeak BITS sistemen bidez.

Orientazioa (°)	Inbertsio kostua (€)	Berokuntza-eskaria (kWh/m ² urtean)	Jatorrizko berokuntza-eskariaren murrizketa (%)	Horma	Beira	Airearekiko estankotasuna n ₅₀ (h ⁻¹)
242	5563.90	9.09	83.30	4 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4/16/4	3
332	5563.90	11.28	82.25	4 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4/16/4	3
62	5563.90	11.09	82.16	4 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4/16/4	3
152	5304.31	5.52	88.37	4 cm-ko isolamenduarekin	BUI 4/16/4 emisibitate baxukoa	3

Airearekiko estankotasunari dagokionez, n₅₀= 1 h⁻¹ hautatu da helburu bezala aireztapen sistema mekanikoen beharra ez edukitzeko eta aire-ihesek sortzen dituzten galera termikoak ahalik eta gehien murrizteko.

Azkenik, leihoen kasuan beira hirukoitzako BUI proposatu dira kasu guztientzat 152° orientaziorako kasurako izan ezik. Azken honetan, 4.9. Irudian erakusten den bezala ez da hobekuntza nabarmenik lortzen BUI mota hauekin, gainera orientazio haueko etxebizitzak berez berokuntza-eskaria txikiagoa lortzen dute emisibitate baxuko beira bikoitzarekin beste orientazio eta beira hirukoitzekin alderatuta.

Proposatutako kasuekin lortzen diren jatorrizko berokuntza-eskariaren murrizketa orientazioaren arabera, %89tik %95raino dira KITS kasuetan eta %82tik %88raino BITS kasuetan. Beraz, emaitzen arabera eta kontuan izanda kWh/m² urtean ezarritako berokuntza helburua posible da birgaitze energetikoen bitartez aztertutako eraikin tipologiaren energia eraginkortasuna erabat hobetzea. Hala ere, kontuan izan behar da burututako ikerketa erreferentzako etxebizitza baten emaitzetan oinarritzen dela. Beraz eraikin osoaren edo eraikinaren beste unitateen berokuntza-eskaria, hala nola atikoetan edo lehengo solairuko etxebizitzetan, areagotu daiteke kasu hauek kanpoko baldintza klimatikoak gehiago jasaten dutelako. Edonola ere, garatutako ikerketa era berean aplikatu liteke eraikin osorako beste kasuetan ere portaera energetikoa aztertu ahal izateko.

4.5. Ondorioak

Kapitulu honen helburua esku-hartze pasiboen bitartez lortu daiteken jatorrizko berokuntza-eskariaren murrizketa zehaztea da eraikitako ondarearen tipologian.

Horretarako, lehenik eta behin simulazio eredu bat oinarri bezala hartuta, esku hartze bakoitzaren efektua aztertu da. Analisi honen bidez inguratzaile termikoan eragina duten ezaugarri garrantzitsuenak detektatzea posible izan da. Isolamendua termikoa,

leihoen aldaketa edo airearekiko estankotasuna izan dira kontuan hartu diren parametroak simulazioan.

Ondoren, esku-hartze guztien efektu konbinatua aztertu da kasu bakoitzaren inbertsio kostua kontuan izanda; era honetan, guztira 420 simulazio eredu kalkulatu egin dira. Azterketa honek ahalbidetu egin du birgaitze optimoak detektatzea energia-inbertsio kostuaren loturari dagokionez.

Beraz, emaitzen analisi orokorra aztertu ondoren, kapitulu honekin lortu diren ondorio zehatzak honako hauek dira:

- Isolamendu termikoaren bitartez lortu daitekeen berokuntza-eskariaren murrizketa jatorrizko eskariaren %37tik-%53raino da isolamendu termikoaren lodieraren eta erreferentzia kasuaren orientazioaren arabera.
- Berokuntza-eskariaren murrizketa kurbak isolamendu termikoaren lodieraren arabera asintota horizontalaren joera du. Isolamendu termikoaren 10 eta 12 zentimetro baino gehiagoko lodieraren handitzeak ez du nabarmeneko emaitzarik.
- Airearekiko estankotasunaren hobekuntza 2.1-2.6 kWh/m² urtean arteko murrizketa lortzen du n₅₀ maila 1 h⁻¹ murrizten denean.
- Jatorrizko berokuntza-eskariaren %24-%31 bitarteko murrizketa lortu daiteke aireztapen natural sistema mantentzen bada. Beste aldetik, lortu daitekeen murrizketa maximoa %36tik %46era izan daiteke aireztapen sistemak erabiltzen badira Barruko Airearen Kalitatea mantendu ahal izateko.
- Leiho aldaketen bitartez, posible da jatorrizko berokuntza-eskaria %12-%21 arteko murrizketa lortzea.
- Erabilitako BUI mota orientazioaren arabera izan behar da. Hegoalderantz orientatutako etxebizitzetan ez da oso nabarmeneko emisibitate baxuko beira hirukoitza sistemekin lortzen den berokuntza-eskariaren murrizketa emisibitate baxuko beira bikoitzeko sistemekin alderatzen bada. Desberdintasun hau aztertutako kasuan %0.4 da.
- Aztertutako simulazio ereduaren arabera, birgaitze energetikoen kasu optimoen bitartez jatorrizko berokuntza-eskaria etxebizitzaren orientazioaren arabera %58tik-%73raino murriztu daiteke.



- **Proposatutako birgaitze energetikoen bitartez, lortutako berokuntza-eskariaren murrizketa etxebizitzaren orientazioaren arabera %89tik-%95raino da KITSak erabiltzen badira eta %82tik-%88raino BITSen kasuetan.**

V. Kapitulu

Capítulo V

Eraikinak monitorizatzeko tresnak

Herramientas para la monitorización de edificios



Laburpena:

Aldagaiak neurtzea, kontrolatzea eta erregistratzea fase espermental guztietan funtsezko zereginak dira. Kapitulu honetan eremu honetako mugak konpontzeko aukera eman duen ikerketa ildoetako bat aurkezten da. Kapitulu honek ikerketa-kasu zehatz batean egindako lana garatzen du, burututako monitorizazioa eta erabilitako ekipamenduaren aurreko garapena azalduz. Bestalde, kapitulu honetan lortutako emaitzen zati bat *"Environmental monitoring system based on an Open Source Platform and the Internet of Things for a building energy retrofit"* Automation in Construction nazioarteko aldizkariaren VSI: Smart Infrastructure-IoT edizio berezian argitaratutako artikuluan aurkeztu zen

Resumen:

La medición, control y registro de variables se convierte en una de las tareas fundamentales en toda fase experimental. Este capítulo presenta una de las líneas de investigación que ha permitido dar solución a las limitaciones existentes en este campo. El capítulo desarrolla el trabajo llevado en un caso concreto de estudio a través de su monitorización y el desarrollo previo del propio equipo utilizado. Por otro lado, parte de los resultados obtenidos en este capítulo fueron presentados en el artículo *"Environmental monitoring system based on an Open Source Platform and the Internet of Things for a building energy retrofit"* publicado en la edición especial VSI: Smart Infrastructure-IoT de la revista internacional *Automation in Construction* en el año 2018.

5.1. Sarrera

Gaur egun, hiriek erabateko aldaketa operatiboak jasaten ari dira. Hiri Adimentsuak deituriko modelo berri hauek biztanleen bizitza kalitatea hobetzen saiatzen dira inguruko datuak bilduz Informazio eta Komunikazioaren Teknologia (IKT) erabilia [1]. Egoera berri honek aukera ematen die biztanleei hiriak osatzen dituzten elementu adimentsuekin modu eraginkorragoan elkarreragiteko, hala nola, azpiegiturak, eraikuntzak edota eraikinak (Smart Infrastructures, Constructions and Buildings SICB). Bere eragina dela eta, fenomeno honek interes handia piztu du akademia eta industria arloetan [2].

Gainera, Gauzen Interneta (GI) Hiri Adimentsu eta SICB-en helburuak lortzen laguntzen duen teknologia da [3]. Ibilgailuen trafikoaren [4] eta aparkalekuen kudeaketaren optimizazioa [5], ur-ihesen detekzio [6] eta kudeaketa [7] sistemen garatzea, eraikinen energia-eraginkortasuna hobetzea [8] edo etxetresnak [9] dira teknologia honen aplikazioaren adibide batzuk eraikin eta hirietan.

Birgaitze energetikoaren arloan, begietsitako alderdi bat eraikinen monitorizazioa da. Monitorizazioa mota honetako esku-hartzeak optimizatzeko tresna gisa erabili daiteke. Izan ere, birgaitze prozesuaren ondorioz lortutako hobekuntzen konparazio kuantitatiboa ahalbidetzen du, arreta berezia jarriz parametro bereizgarrietan: energia kontsumoa, barruko erosotasuna, airearen kalitatea edo inguratzaile termikoaren ezaugarriak. Hala ere, batzuetan ezin dira aurrera eraman monitorizazio kanpaina hauek bere gehiegizko kostuagatik eta beharrezko baliabideek proiektu gehienen baliabideak gainditzeko [10].



Bestalde, indar handia hartzen ari den ikerketa lerroetako bat software eta hardware irekiko aplikazioekin loturik dago. Adar horietako bat Iturburu Irekiko Plataforma (IIP) ezagunak dira. Hauek norberak garatutako proiektuak burutzea ahalbidetzen dute ezagutza hori komunitatearekin partekatuz [11]. Gainera, teknologia hau erabiltzen ari den aplikazioetako bat ingurumen monitorizazioa da [12]. Honek eraikinen ingurumen-portaeraren ikerketa era errazago batean gauzatzea ahalbidetzen du, eta honek aldi berean erabakiak hartzeko prozesua errazten du.

Ikerketa Taldeak duen esperientzia eraikinen energiaren monitorizazioan [10,13,14] eta gaiari buruzko egin den literatura berrikuspenaren bidez [15-21] zenbait hutsune, arazo eta alternatiba berri detektatu dira. Monitorizazio kanpainetan aurki daitezkeen arazoen artean honako hauek daude: aldagai kopuru mugatuko monitorizatzeko gailuak, kostu altuko eskuratze-gailuak, datuen biltegitate gaitasun baxuko ekipoak, plataforma edo eskuratze-gailu desberdinak behar izatea neurketak egiteko edo denbora errealean datuak kontsultatzeko gai ez izatea. Arrazoi hauek ondorengo ikerketa garatzea motibatu dute, bere helburua monitorizazioaren sektorean aurki daitezkeen erronkei aurre egitea izan delarik. Horretarako eta Hiri Adimentsuen eremuan sistema berritzaile bat garatzeko, aipatutako tresna eta teknologia berrien konbinazioa funtsezkoa bihurtu da.

5.1.1. Eraikinen monitorizazioa

Eraikinen monitorizazioa tresna oso erabilgarria da arlo askotan. Etxeko mailan, etxeko energiaren monitorizazioak eta automatizazioak energia modu eraginkorrago eta zentzuago batean erabiltzera bultzatzen dute kontsumitzaileak. Izan ere, modu honetan bere etxetresna elektrikoaren ikuspegi orokor bat izango lukete [22]. Hala ere, azpimarratzekoa da monitorizazioa ikerketa helburu askotarako izan daitekeela baliotsua. Horren adibide ezaugarri termikoen ereduaren garapenean dugu [14], edota eraikinen energia kalibraketa eta baliozkotze prozesuetarako datu gisa [23].

Etxeko sektorean, monitorizazioaren helburuetako bat energia kontsumoa gutxitzea da erabiltzaileari energiaren inguruko informazioa eskainiz. Informazioa hau, Darbyren arabera [24], hiru printzipioetan oinarritzen da: energiaren erabileraren ezagutza, erabiltzailearen portaeraren aldaketa eta energia kontsumoan gertatu diren aldaketen interpretazioan. Egile beraren arabera, kasu gehienetan, energia kontsumoa ikusezina da erabiltzailearentzat. Horregatik, feedback mota desberdinak tresna gisa erabilia, hauen eragina kontsumitzaileen energia portaeran aztertu zuen. Ikerketa honekin erakutsi zuen "denbora errealeko irakurgaiak eskainiz" (feedback zuzena) %5-15-eko energia aurrezteko lortu zitekeela eta zeharkako informazioaren (fakturazioa) bitartez, aldiz, %0-10. Shaikenen ikerketak [25] adierazten duenez, "Oro

har, energia ezezaguneko jarduerak eraikinaren energia errendimenduari heren bat gehitu diezaiokete". Horrez gain, automatizazioa erabiliz posible da eraikinen %30-eko energia aurrezte.

Laburbilduz, argi geratu dira monitorizazioak eta automatizazioak aurkezten dituzten abantailak, baita ere interes handia sustatu duela bere inplementazioak eraikinen energia optimizazioaren arloan (eraikinetako teknikaria, ikertzaileak, energia kudeatzaileak...). Hala ere, oraindik burutu gabeko erronkek (gailuen bateragarritasuna, segurtasuna, kostua, sentsoreak garatzeko potentziala eta IKT-en azpiegitura falta) [26] zailtzen dute bere aplikazio eraginkorra eskala handian [27-29]. Hori dela eta, gaur egun, masa hedapen gaitasunak dituzten tresna irekiagoak beharrezkoak dira.

5.1.2. Gauzen Interneta

Gauzen Internetari (GI) hurrengo Industria Iraultzaren edota Interneten hurrengo bilakaeraren izena eman zaio. Enpresek, gobernuek eta kontsumitzaileek mundu fisikoarekin elkarreragiten duten moduan eragina izango du eta horretarako erabiliko diren tresnak Internet bidez konektaturiko sentsoreak, kamerak, mugikor adimentsuak eta beste GI gailu adimentsuak izango dira. Cisco-ren arabera [30], Gauzen Interneta (GI) internetera konektatutako "gauza edo objektuen" zenbakia pertsonen zenbakia baino handiago izan zenean gertatu zen. Enpresak adierazten duenez, momentu hori 2008 eta 2009 artean gertatu zen mugikor adimentsu eta tablet-en erabilerak igoera esponentziala izan zuenean.

GI ideia indar nagusia eguneroko bizitzan eta erabiltzaileen portaeran izango duen eragin datza [31]. GI paradigma teknologikoa da eta eguneroko gailuen konektibitatea areagotzeko helburua du. Hori dela eta, datozen urteotan horrelako teknologien hazkundera eta erabilera esponentzialki handituko da aplikazio eremu anitzetan. Aurreikusitako hazkundera hain handia da non gaur egun estimatutako 6400 milioi GI gailuk gora egingo dute 20800 [32]- 50000 [30] milioiraino 2020 urterako.

GI-ak gehikuntza bat aurkezten du makina-makina (M2M) komunikazioan eta konexiorik gabeko arloan, sentsore eta eragingailu integratuen erabilpenean. Tresna hauen bidez erabiltzaileak monitorizazio eta kontrol gailuak modu eraginkorrago batean erabili ahal izango ditu [33]. Paradigma berri honetan, gailu adimentsuek datuak bilduko dituzte, informazioa transmititu edo bata bestearekin konektatu, eta informazioa prozesatu *cloud-computing* eta antzeko teknologiak erabiliz. Azkenik, gizakiek ekintzak aurrera eramango dituzte, eta kasu batzuetan ere, makinak automatikoki. Paradigma aldaketa honek ingeniartzan erronka eta aukera ugariak sortzen ditu [34].



Monitorizazioaren sektoreak hartzen ari den garrantziagatik eta datozen urteetarako espero den GI-aren hazkundeagatik enpresa askok sektore honetan aurrera pausoak ematen ari dira etengabe [35]. Gainera, aplikazio desberdinetarako (gordetzeko, bistartzeko edo partekatze) erabili daitezkeen Interneteko zerbitzarien zerrenda [36-39] zabalitzen ari da, horrela monitorizazio metodologietan urrats gehiago ematea ahalbidetuz.

Laburbilduz, GI beharrezko tresna da lan eta ikerketa eremu askotarako. Aldi berean, GI-aren eta IIP-en arteko konbinaketak teknologia indartsu batean transformatzen du. Modu honetan, erabiltzaileak sistemak garatzeko eta denbora errealean ingurua ulertzeko eta honi buruzko erabakiak hartzeko gai izango dira. Alderdi hau, adierazi dugun bezala, funtsezko bihurtu da azkenaldian.

5.2. Helmena eta helburuak

Arestian aipatu den bezala, monitorizazio arloan zenbait arazo detektatzea posible izan da. Horren ondorioz, kapitulu honen helburu nagusia gaur egungo eraikinen monitorizazio kanpainetan agertu daitezkeen zailtasunak eraikinen monitorizatzeko metodologia berri baten bidez aurre egitea da. Beraz, era honetan ohikoak diren trabak saihestea lortu izango da, hala nola, gailuen erosketa kostu handiak, datuak biltegitratze gaitasun txikia, neurketa puntu kopuru mugatua edo biltegitratutako datuak denbora errealean kontsultatzeko posibilitatea ez izatea.

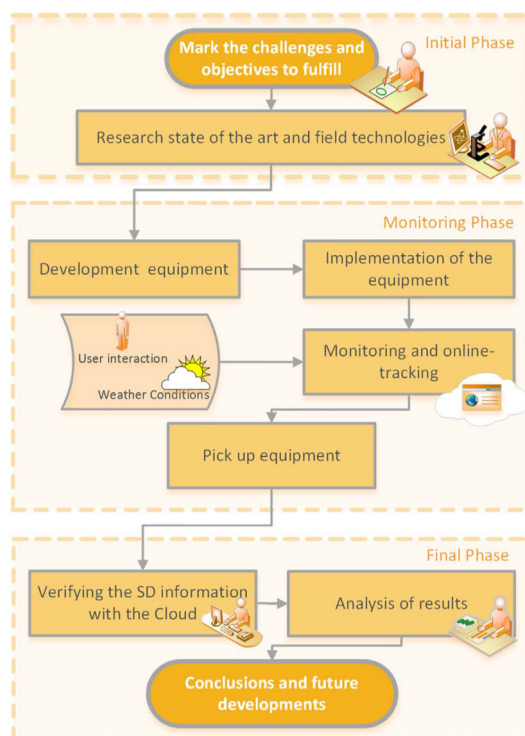
Hortaz, kapitulu honek hurrengo helburuak ezartzen ditu:

- 5.1. Helburua** Eraikinen askatasun osoz monitorizatzeko eta kontrolatzeko ahalbidetzen duen gailuen garapenerako metodologia burutu.
- 5.2. Helburua** Gutxienez monitorizazio ekipamendu komertzialek eskaintzen dituzten ezaugarri teknikoak betetzen dituen kostu baxuko monitorizazio gailu bat garatu.
- 5.3. Helburua** Azterketa kasu batean garatutako monitorizazio gailuaren funtzionamendu egokia kontrastatu.
- 5.4. Helburua** Garatutako gailuarekin lortutako emaitzak erreferentziako monitorizazio gailu batekin egiaztatu.

5.3. Metodologia

5.3.1. Kapituluaren egitura

Ikerlan honetan erabilitako metodologia eta egindako urratsak **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Irudian agertzen den fluxu-diagraman laburbiltzen dira. Hiru etapa desberdinez osaturik dago.



5. 1. Irudia- Kapitulu egituraren deskribapen grafikoa

Hasierako fasean monitorizazioak bete beharreko helburuak eta erronkak zein diren argitzen dira. Urrats hau oso garrantzitsua da, izan ere, ikerketan zehar egingo den aurreragoko bidea zehaztuko du. Ondoren, beharrezkoa da teknologien berrikuspen bat egitea kalitatezko ikerketa sustatzeko eta lehendik dagoen ezagutzarekin osatu.

Hurrengo faseak monitorizazio fisikoa aurrera eramateko beharrezkoak diren fase guztiak biltzen ditu, proposaturiko ekipoaren diseinu eta muntaiatik, eraikineko ekipoaren bildumara arte. Fase honetan denbora errealean grabatutako parametroen eboluzioa eta bere funtzionamendu zuzena egiaztatzen da.

Azken urratsean, datuak gailutik atera ondoren, ekipoaren memoria fisikoan gordetako datuen adostasuna egiaztatzen da hodeian erregistratutakoekin alderatuta. Ondoren, emaitzak aztertzen dira ebaluatutako parametroen arteko loturak ezartzeko helburuarekin, patroien existentzia detektatuz eta erregistratutako balioak ebaluatuz.



Emaitzak aztertu eta gero, azterketaren ondorioak lortzen dira eta garapen osagarri edo hobetuak proposatzen dira etorkizuneko monitorizazioetarako, beraz, ikerketa burutuz.

5.3.2. Prototipoaren garapena

Gaur egun, neurketa-sistemen eta sentsoreen aniztasun handia dago merkatuan sofistikazio eta funtzionalitate maila desberdinekin. Aukera hoberenaren hautaketak faktore desberdinen eta monitorizazio beharrenden mende dagoen erroka da [26]. Kasu honetan garatu beharreko gailuak honako baldintzak bete beharko lituzke:

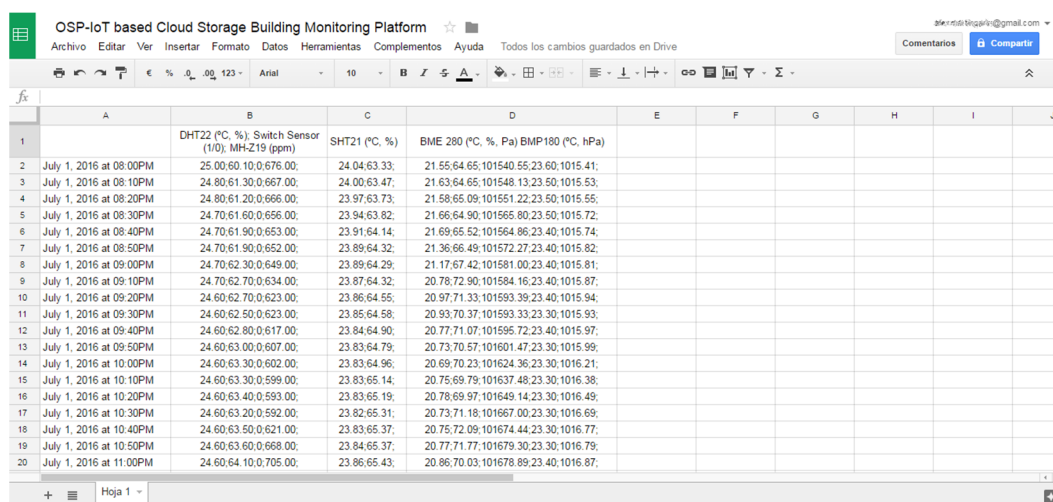
- Sistema ez-inbaditzailea izatea.
- Kostu baxuko garapen gailua izatea.
- Behar espezifikoak betetzeko askatasuna izatea ekipoaren garapenean.
- Haririk gabeko datuen transmisioa edukitzea.
- Datuak biltzeko segurtasuna edukitzea haririk gabeko konexioa edo energia hornidura galduz gero.
- Datuen biltegitate handia edukitzea.
- Erregistratutako datuak denbora errealean kontsultatzeko aukera izatea, bai *in situ* eta baita *online*.

Aurreikusitako beharrak kontuan hartuta, eskakizun hauek betetzen dituen gailua garatu zen. Funtsean, sistema bi funtzio dituen mikrokontrolagailu batez osaturik dago.

Alde batetik, protokolo desberdinen bitartez mikrokontrolagailuarekin komunikatuta dauden sentsore desberdinetatik datozen sarrerak kudeatuko ditu. Bigarren funtzioa bildutako informazioaren azterketa eta kontsulta ahalbidetzea izango da. Horretarako, hiru motatako irteera desberdin proposatu dira.

Lehenik eta behin, erabiltzaileari informazioa zuzenean emateko helburuarekin, OLED pantaila bat prestatu da *in situ* bildutako informazioaren kontsulta ahalbidetzeko, denbora errealean erregistratutako balioak erakutsiz. Bigarrenik, sentsoreen informazioa modu seguru batean biltegitate ahalbidetzen duen mikroSD txartela batekin hornitu da prototipoa. Metodo honek biltegitate handiko sistema aurkezten du abantaila bezala eta gainera, datuak oso eskuragarri dira erabiltzaile eta teknikarientzako oso erabilitako estandarra baita. Azkenik, datuak edonondik atzitzeko, GI plataformak erabili dira informazioa WiFi bidez transmitituz mikrokontrolagailutik Google Drive kalkulatu orri biltegitate sistemetara. Horretarako, urrats batzuk eman dira. Lehenengoak mikrokontrolagailuak eta sentsoreek grabatutako aldagaiak testu kateetan transformatzean dautza. Horretarako programazio-kodeak erabili dira eta prozesaketa errazten duen aldagaien arteko

banaketa egiteko “;” elementua erabili da. Ondoren, programazio-kodearen bidez, web eskaera bat sortzen GET baten bidez, aldez aurretik sortutako testu-kateez gain, informazioa transmititzeko beharrezkoak diren datuak gehitzen ditu (host, identifikazio kodea eta segurtasun kodea). Azkenik, testu-kateak kalkulu-orri batera iristen dira. Bertan, zenbakizko balioetara eraldatzen dira eta aldagaiak zutabeetan ordenatzen dira aurreko puntu eta komaz bereiztuz. Kalkulu-orriak erabiltzen dira libreki eta oso hedatua den plataformak direlako eta baimendutako erabiltzaileei erregistratutako informazioa biltzea, erakustea eta partekatzea ahalbidetzen die. 5.2.Irudian denbora errealean prototipoarekin Google plataformetan bildutako datuak aurkezten dira.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		DHT22 (°C, %), Switch Sensor (1/0), MH-Z19 (ppm)	SHT21 (°C, %)	BME 280 (°C, %, Pa) BMP180 (°C, hPa)						
2	July 1, 2016 at 08:00PM	25.00;60.10;0.676;0.0;	24.04;63.33;	21.55;64.65;101540.55;23.60;1015.41;						
3	July 1, 2016 at 08:10PM	24.80;61.30;0.667;0.0;	24.00;63.47;	21.63;64.65;101548.13;23.50;1015.53;						
4	July 1, 2016 at 08:20PM	24.80;61.20;0.666;0.0;	23.97;63.73;	21.58;65.09;101551.22;23.50;1015.55;						
5	July 1, 2016 at 08:30PM	24.70;61.60;0.656;0.0;	23.94;63.82;	21.66;64.90;101565.80;23.50;1015.72;						
6	July 1, 2016 at 08:40PM	24.70;61.90;0.653;0.0;	23.91;64.14;	21.69;65.52;101564.86;23.40;1015.74;						
7	July 1, 2016 at 08:50PM	24.70;61.90;0.652;0.0;	23.89;64.32;	21.36;66.49;101572.27;23.40;1015.82;						
8	July 1, 2016 at 09:00PM	24.70;62.30;0.649;0.0;	23.89;64.29;	21.17;67.42;101581.00;23.40;1015.81;						
9	July 1, 2016 at 09:10PM	24.70;62.70;0.634;0.0;	23.87;64.32;	20.78;72.90;101584.16;23.40;1015.87;						
10	July 1, 2016 at 09:20PM	24.60;62.70;0.623;0.0;	23.86;64.55;	20.97;71.33;101593.39;23.40;1015.94;						
11	July 1, 2016 at 09:30PM	24.60;62.50;0.623;0.0;	23.85;64.58;	20.93;70.37;101593.33;23.30;1015.93;						
12	July 1, 2016 at 09:40PM	24.60;62.80;0.617;0.0;	23.84;64.90;	20.77;71.07;101595.72;23.40;1015.97;						
13	July 1, 2016 at 09:50PM	24.60;63.00;0.607;0.0;	23.83;64.79;	20.73;70.57;101601.47;23.30;1015.99;						
14	July 1, 2016 at 10:00PM	24.60;63.30;0.602;0.0;	23.83;64.96;	20.69;70.23;101624.36;23.30;1016.21;						
15	July 1, 2016 at 10:10PM	24.60;63.30;0.599;0.0;	23.83;65.14;	20.75;69.79;101637.48;23.30;1016.38;						
16	July 1, 2016 at 10:20PM	24.60;63.40;0.593;0.0;	23.83;65.19;	20.78;69.97;101649.14;23.30;1016.49;						
17	July 1, 2016 at 10:30PM	24.60;63.20;0.592;0.0;	23.82;65.31;	20.73;71.18;101667.00;23.30;1016.69;						
18	July 1, 2016 at 10:40PM	24.60;63.50;0.621;0.0;	23.83;65.37;	20.75;72.09;101674.44;23.30;1016.77;						
19	July 1, 2016 at 10:50PM	24.60;63.60;0.668;0.0;	23.84;65.37;	20.77;71.77;101679.30;23.30;1016.79;						
20	July 1, 2016 at 11:00PM	24.60;64.10;0.705;0.0;	23.86;65.43;	20.86;70.03;101678.89;23.40;1016.87;						

5.2. Irudia- Google Spreadsheet erabilitako datu biltegi bazea garatutako monitorizazio gailuarentzat.

Sentsoreen hautaketa egiteko, datuak eskuratzeko zehaztasunaz gain, erabilitako komunikazio protokoloa eta beharrezko konexio kopurua hartu da kontutan. Hau da, oro har, sentsore unitate bakoitzak konexio bat behar du plaka elektronikoan, beraz, sentsore zenbakia mugatuta dago plaka sarrera erabilgarrien kopuruagatik. Hala ere, IIPen funtzionaltasun digitalari esker, “*Inter Integrated Circuit*” (I²C) komunikazio protokoloa duten sentsoreak erabiltzea izan da joera. Protokolo honek eskaintzen duen ezaugarrietako bat mikrokontrolagailuaren eta sentsorearen artean informazioa soilik bi konexio harien bitartez transmititzea da. Lehenengo pina *Serial Datarako* (SDA) erabiltzen da datu transmisioen arduradun gisa, eta bigarrena, *Serial Clock* (SCL) da eta datuak irakurtzeko denboraren arduraduna da. Horrela, protokolo honen bidez posible da serial bus beraren bitartez 128 gailu konektatuta edukitzea paraleloki. Izan ere, osagai bakoitzak 2⁷ biteko helbide bakarra du. Honi esker posible izan da sentsoreak mikrokontrolagailuarekin konektatzeko pinen kopurua murriztea, honela, multiplexatutako sistemak edo elkarrekin konektatutako mikrokontrolagailuak saihestea posible izan da.



Plaken hautaketari dagokionez, gaur egun, Raspberry [40] eta Arduinoetan [41] oinarritutakoak dira plataforma erabilienak. Lehenak gaitasun handiak dituzte plaka txiki bakarreko ordenagailuak direlako. Alabaina, aldi berean sistema eragile bat behar dute eragiketak egiteko eta ondorioz, proiektuen konplexutasuna areagotzen da. Bestalde, Arduino plataformekin proiektuak modu erraz batean garatzea posible da sarrerak eta irteerak erraztasunarekin kontrolatzea ahalbidetzen baitute. Are eta gehiago, fidagarritasun maila altua eskatzen duten aplikazioetan Raspberriekiko abantaila bat erakusten dute beren eragiketa mikrokontrolagailuak kontrolatzen baitu [42]. Proiektuaren ezaugarriak direla eta, soilik sarrera eta irteera datuen kontrola eskatzen duena, ikerketa Arduino plataformetan oinarrিতa egongo da. Azkenik, plaka gai izan behar da GI proiektuak garatzeko eta ondorioz, beharrezkoa izango da plakak WiFi konexio integratua edukitzea, *shields* eta *donglesen* erabilerara saihestuz eta beharrezko hardware-a sinplifikatuz.

Datuak eskuratzeko garatutako sistemaren ezaugarri espezifikoak honako hauek dira:

- Taula elektronikoa: ESP-8266 WiFi mikrokontrolagailu indartsuan oinarritzen da [43]. 32 biteko prozesadorea da eta 80 eta 160 Mhz-ko erloju abiadurarekin exekutatzen da 4 Mb-ko flash memoria batekin. Taulak 11 S/I pin digital ditu, sarrera analogikoko pin 1 eta bere dimentsioak 34.2 x 26.6 mm dira. Ordenagailura konektatu daiteke USB edo *Over-the-air* (OTA) metodoaren bidez, haririk gabeko programazio erabilgarria ahalbidetuz plakaren kokapena itzultzea zaila denean edo taula galduta dagoenean. Ezaugarri horiez gain, plaka honek prezio baxua du eta posible da Arduino plaketan garatutako kodea erabiltzea IDE berdina erabiltzen baitute. Gainera, WiFi integratutako mikrokontrolagailu bat da. Ezaugarri guzti hauengatik aukeratu da plaka.
- MikroSD shield: gorde beharreko informazio kantitatea handi dela aurreikusten denean, oso garrantzitsua da MikroSD txarteleko irakurleak erabiltzea. Mikrokontrolagailuarekin erabilitako komunikazio metodoa SD.h liburutegiaren eta *Serial Peripheral Interfazeko* (SPI) protokoloaren bidez da. Garatutako modeloan, 8 Gb-ko biltegitze-ahalmena duen MikroSD memoria txartel bat erabili da.
- Ingurune sentsoreak: lehendik dauden modeloen dibertsitate handiagatik eta ikerketa taldearen interes handiagatik, egokia izan da zenbait modelo hautatzea errendimendu testak egiteko. Helburua da emaitzak aztertzea eredu bakoitzarekin eta bere kalitatearen arabera, sentsore optimoa zein den gomendatzea erabileraren arabera.

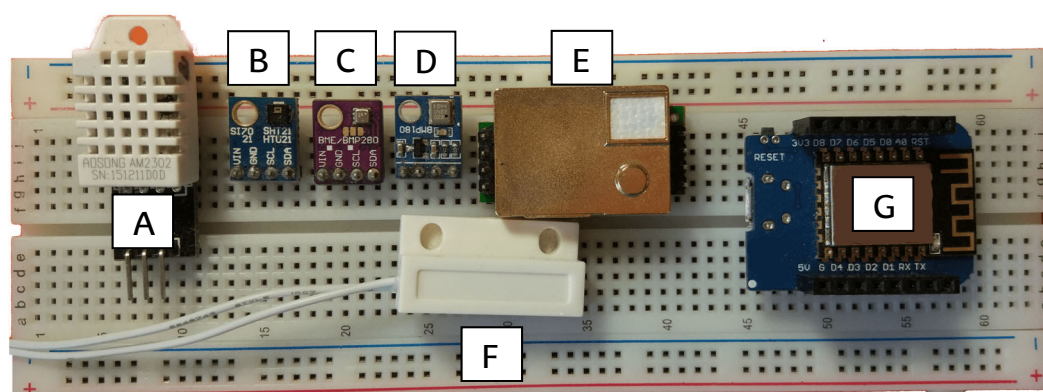
- DHT22 [44]: oinarrizko eta kostu txikiko sentsore digital bat da. Termistore bat erabiltzen du temperatura neurtzeko (-40 eta 80 °C artean) eta sentsore kapazitiboa hezetasun erlatiboa neurtzeko (%0 eta %100 artean). ± 0.5 °C-ko zehaztasuna aurkezten du temperaturan eta ± 2 hezetasun erlatiboan eta 0.1 °C-ko eta %0.1-eko bereizmena. Sentsore honek hari bateko komunikazio protokoloa erabiltzen du datuak bidaltzeko eta 3.3 eta 5.5 V-ko tentsioarekin hornitu behar da. Irakurketa bakoitzaren arte gutxienezko denbora 2 s dira. Honek bere aplikazioa zenbait proiektutan mugatu dezake. IIP proiektuetan, sentsore hau temperatura eta hezetasun sentsoreen artean erabilienetakoa da. Are gehiago, aurkezten dituen ezaugarriak datuak eskuratzeko ohiko sistemen antzekoak dira. Beraz, sentsore hau ekipamendu pieza egoki bat izan daiteke ingurumenaren monitorizazio gailuetarako.
- SHT21 [45]: sentsore konbinatu honek sentsore kapazitibo bat erabiltzen du hezetasuna neurtzeko eta *band gap* sentsore bat temperatura neurtzeko. Neurketa tartekak -40 °C-tik 125 °C-ra doa eta %0-tik %100-era, ± 0.3 °C eta ± 2 -ko zehaztasunarekin eta 0.01 °C eta %0.04-ko bereizmenarekin. Sentsoreak 2.1 eta 3.3V arteko tentsio hornidura behar du eta sentsorearekin komunikazio metodoa I²C protokoloaren bitartez da. Sentsore hau Sensirion-ek garatzen du, fabrikatzaile honen sentsoreak oso erabiliak dira ingurumen monitorizaziorako ekipamendu komertzialetan. Ikerketa honetan sentsore hau erabiltzearen arrazoiak honako hauek dira: sentsorearen kalikatea, I²C komunizazio protokoloa eta ingurumen monitorizazio sistemetan izaten ari den hedapen handia.
- BMP180 [46]: presio barometrikoa eta temperatura neurtzeko kostu baxuko sentsore bat da. Neurketak 300 eta 1100 hPa eta -40 °C eta 85 °C tartetean egin daitezke, ± 1 hPa eta ± 1 °C-ko zehaztasunarekin eta 0.02 hPa eta 0,1 °C-ko bereizmenarekin. Sentsoreak 1.8 eta 3.6 V-ko tentsio hornidura behar du eta I²C komunikazio protokoloa erabiltzen du. SHT21-aren era berean, BMP180 sentsorea oso erabilia da sistema komertzialetan presio atmosferikoa neurtu behar denean. Ezaugarri hauek direla eta, modelo egokitzat hartu zen bere ebaluaziorako.
- BME 280 [47]: BMP180 sentsorearen bilakaera da eta hezetasun erlatiboa neurtzeko gaitasuna du gehigarri bezala. 300 eta 1100 hPa-ko, -40 °C eta 85 °C-ko eta %0 eta %100-eko neurketa tartekak ditu. ± 1 hPa, ± 1 °C eta ± 3 -ko zehaztasuna du eta 0,18 Pa, 0.01 °C eta %0.008-



ko bereizmena du. BMP180-ak bezala, 1.8 eta 3.6 V tarteko tentsio hornidura behar du eta I²C komunikazio protokoloa erabiltzen du. Sentsore hau ebaluatu da bere erabilerak BMP180-arekiko abantailaren bat ematen duen aztertzeke.

- Etengailu magnetikoko sentsorea: bi elementuz osaturiko gailua da, iman bat eta xafla etengailua. Xafla etengailua bi kontaktu isolatuen kapsulatzean datza. Alabaina, intentsitate nahikoa duen eremu magnetikoa gertu dagoenean, imana, kontatuak itxita daude. Sentsore hau oso erabilia da ateen eta leihoen irekiera sistemetan, xafla etengailua pieza finkatuan egonik eta imana mugitzen ari den elementuan.
- CO₂ sentsorea: erabilitako sentsorea MH-Z19 da [48]. Ohiko mota da, tamaina txikikoa, *non-dispersive infrared* (NDIR) printzipioan oinarritzen da CO₂-aren existentzia detektatzeko airean, hautakortasun onarekin, oxigenoaren ez menpekoea eta bizitza luzekoa. Inkorporatuta duen tenperatura sentsoreak tenperatura konpentsazioa egin dezake; eta tentsio irteera analogiko eta digitalak ditu UART edo PWM seinale irteera komunikazio protokoloen bitartez. Bere lan tentsioa 3.6 eta 5.5V artean dago, 0 eta 5000 ppm-ko kontzentrazioen neurketa posible izanik ± 50 ppm-ko zehaztasunarekin. Aurrez berotzeko epea 3 minutukoa da eta CO₂ kontzentrazioaren balioa egonkorra bihurtzen da. Mota honetako sentsoreek metodo elektrokimikoetan oinarritutako sentsoreek baina kontsumo altuagoa dute, baina erabiliagoak dira denbora errealeko monitorizazioan bere iraupen, fidagarritasun eta zehaztasunagatik [51].
- OLED *display*-a: 0.66"-ko OLED modulu bat erabili da ekipamenduak erregistratutako balioak in situ islatu ahal izateko. I²C komunikazio protokoloa erabili dezake, gailu oso trinkoa ahalbidetuz. Lan tentsioa 3.3V-ko da. *Display* hau 64 x 48-ko pixel zuriez osaturik dago eta ez du behar atzeko argirik, honela kontsumoa gutxituz.

Ikusi daitekenez, 5.3. Irudia, erabilitako ekipamendu guztia IIP plataformetan oinarrituta dago, *hardware*-etik *software*-era. Alderdi honek proiektuaren eskaera espezifikoen araberrako ekipamendua garatzeko aukera eman zuen. Aldi berean, bildutako informazioa modu ireki batean lortzea, tratatzea eta partekatzea posible izan da eta erabilerak murriztapenik gabe.



5. 3. Irudia- Garatutako monitorizazio gailuaren elementu sorta bat: A) DHT22 B)SHT21 C)BME280 D)BMP180 E)MH-Z19 F)Switch sensor G) ESP8266 mikrokontrolagailua.

5.3.3. Sentsoreen kalibraketa

Temperatura eta hezetasun sentsoreen funtzionamendu egokia egiaztatzeko, erreferentzia ezagunekin kalibratu dira esperotako den lan-eremu barruan.

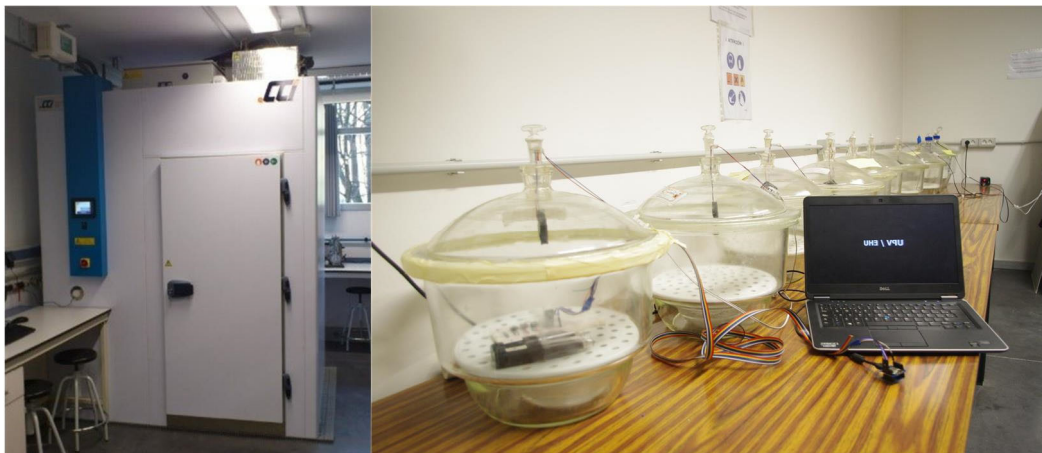
Temperatura sentsoreen kalibraketa egiteko klima ganbera bat erabili da, 5. 4. Irudian ikusi daitekenez. Horretarako, 10 °C-ko temperatura urratsak programatu ziren azterketa klimaren ohiko muturren artean, ikerketa eremua 5 °C eta 35 °C artean egonik. Ondoren, kalibratutako temperatura datu bilketa sistema erreferentzia bezala erabili da ikerketa sentsoreentzat. Erabilitako datu bilketa sistema AHLBORN 2549 FHAD 46-2 sentsorearekin ± 0.3 °C-ko zehaztasunarekin. Laginketa tartea 1 min izan zen eta erreferentzia 90 min mantendu zen temperatura urrats bakoitzean.

Hezetasun sentsoreen kalibraketa disoluzio akuoso asean metodoa [49,50] erabiliz egin zen. Metodo honetan huts beirazko lehorgailuak (huts-gabe) erabiltzen dira eta bertan disoluzio akuosoak sartzen dira oreka higrotermikoa lortuz itxitura barruan, 5. 4. Irudia. Hezetasunaren banaketa uniformea lortzeko barrualdean, ontziek barruko ingurua homogeneizatzen duten haizagailu batzuk dituzte. Hezetasun maila ezberdinak gatz asean disoluzio akuoso ezberdinekin lortzen dira temperatura konstante batean. Ikerketa honetan, balio tarte zabal bat barne hartzen duten disoluzioak ikertu dira; temperatura 23 °C \pm 0.5 °C-tan ezarri da. Hezetasun erlatiboaren oreka honako puntu hauetan egin da: LiCl %11.30, MgCl₂ %32.89, Mg(NO₃)₂ %53.30 eta KCl %84.64. Ondoren, sentsoreak sartzen dira ontzien barruan kalibratzeko eta orekara iristean balioak erregistratzen dira. Bilketa tartea minutu 1 izan zen eta bilketa 24 h egin zen kasu bakoitzerako.

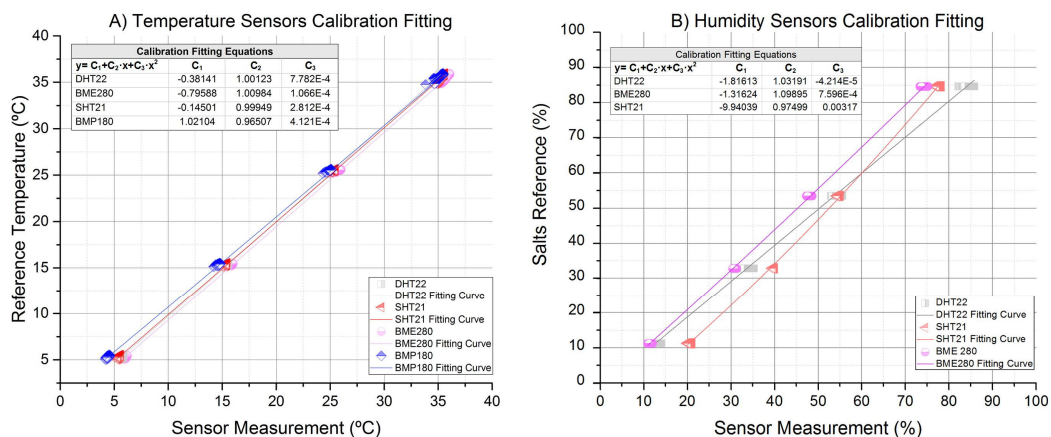
Azkenik, doikuntza protokoloen ondoren, kalibraketa kurbak lortu ziren, 5.5.Irudia. Kurba hauek korrespondentzia ematen dute sentsorearekin neurtutako balioaren eta erreferentzia balioaren artean. Doikuntza kurba hauekin, temperatura eta hezetasun



bakoitzaren transferentzia funtzioak zuzendu ziren kalibraketa erreferentzia ezartzeko. Horretarako, tenperatura zein hezetasun sentsoretarako, ekuazio kuadratikoa eta koefizienteen (C1, C2 eta C3) doikuntza ezarri zen monitorizazio sistemaren programazio kodean. Doikuntza honen bidez, hasieran grabatutako balioak doitu eta egongo liriteke, honela, monitorizazio gailuak kalibratutako balioak zuzenean erregistratzen dituelarik.



5. 4. Irudia- Laborategiko klima ganbera eta beira ontzi ekipamendua sentsoreen kalibrazio prozedurako.



5. 5. Irudia- Sentsoreen kalibrazio kurbak: A) Aire tenperatura eta B) Hezetasun erlatiboa.

5.3.4. Azterketa kasua

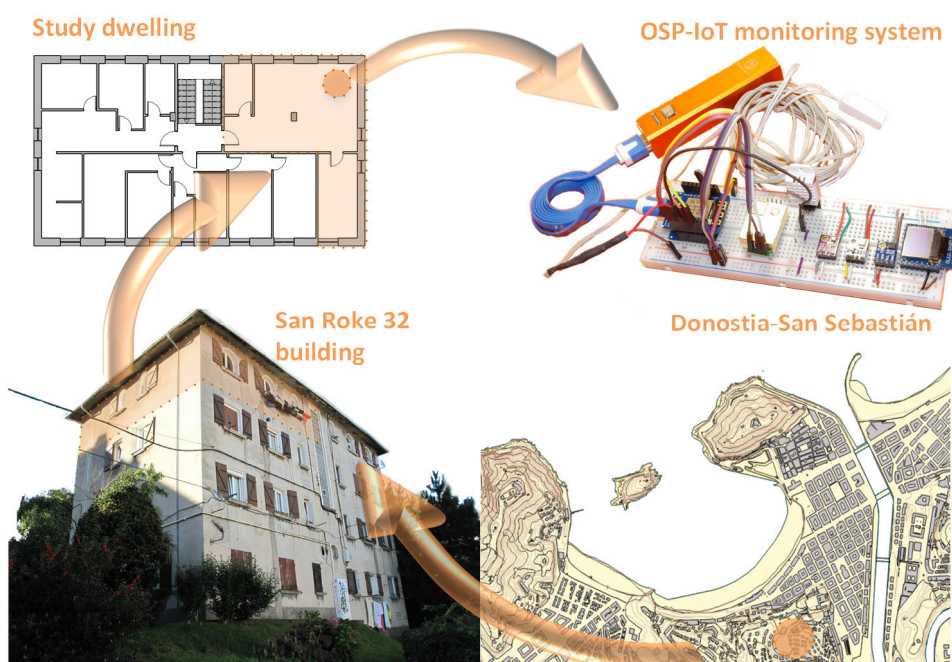
Monitorizazio ekipoaren funtzionamendu egokia egiaztatzeko, sistema etxe unitate batean ezartzea erabaki zen. Apartamentu hau Donostia-San Sebastian hiriko eraikin batean dago, 5.6.irudian ikusi daitekeen bezala. EuroPHit Europar Programaren barruan, eraikuntzaren transformazio orokor bat egingo da birgaitze energetiko baten bidez [51].

San Roke eraikina 4 pisuko eraikuntza bat da eta 10 apartamentu eta eremu komun bat izanik. Ingurutzaila termikoak ez du inongo isolamendurik. Aireztapena naturala da, leihoen irekitze erabiliz. Jatorrizko leiho eta pertsianak egurrezkoak dira kristal

bakarrarekin, baina jabe batzuk ordezkatu dituzte urteetan zehar. Fatxadaren egoera txarrak, adreiluez eginda dagoena, jabeek neurriak hartzera derrigortu zituen ikuskapen tekniko baten ondoren. Teilatua egurrezkoa da eta 1994an hobetu zen.

Azterketa apartamentua, 46m²-koa, eremu zabal bat du eta bertan egongela, jangela eta sukaldea, bainugela eta logela aurkitzen dira. Iparraldera eta ekialdera orientatuta dago. Kontserbazio egoerari dagokionez, ikusi daiteke eraikutzaren birmoldaketa egin dela eraikuntzan ekipamendu eta altzariei dagokionez.

Monitorizazio ekipamendua gela nagusian aurkitzen da etxearen portaera orokorra zehaztasun handiagoarekin irudikatzen duelako. Izan ere, erabilera anitzak ditu eta erabiltzaileek informatu bezala, gehien erabilitako kokapena da. Bestalde, ekipamendua iparralderantz orientatuta dagoen leiho batean kokatu da kanpoko sentsoreetan erradiazio zuzena ekidatzeko, eta aldi berean, gehiegizko kableatua ekidatzeko mikrokontrolagailuaren eta neurketa puntuaren artean. Gainontzeko sentsoreak mikrokontrolagailuaren ondoan daude, honela, dimentsio txikiko ekipamendu trinkoa lortuz.



5. 6. Irudia- San Roke 32 azterketa kasua, eraikinaren kokapena, apartamentua eta monitorizazio gailua.

5.4. Emaitzak eta eztabaida

Atal hau ikerketa honen alderdi garrantzitsuenak aztertzen saiatzen da. Horretarako, lehendabizi etxebizitzaren monitorizazioan grabatutako emaitza orokorrak aurkeztuko dira bere portaera higrotermikoa eta BAK ezagutzeko. Gainera, atal

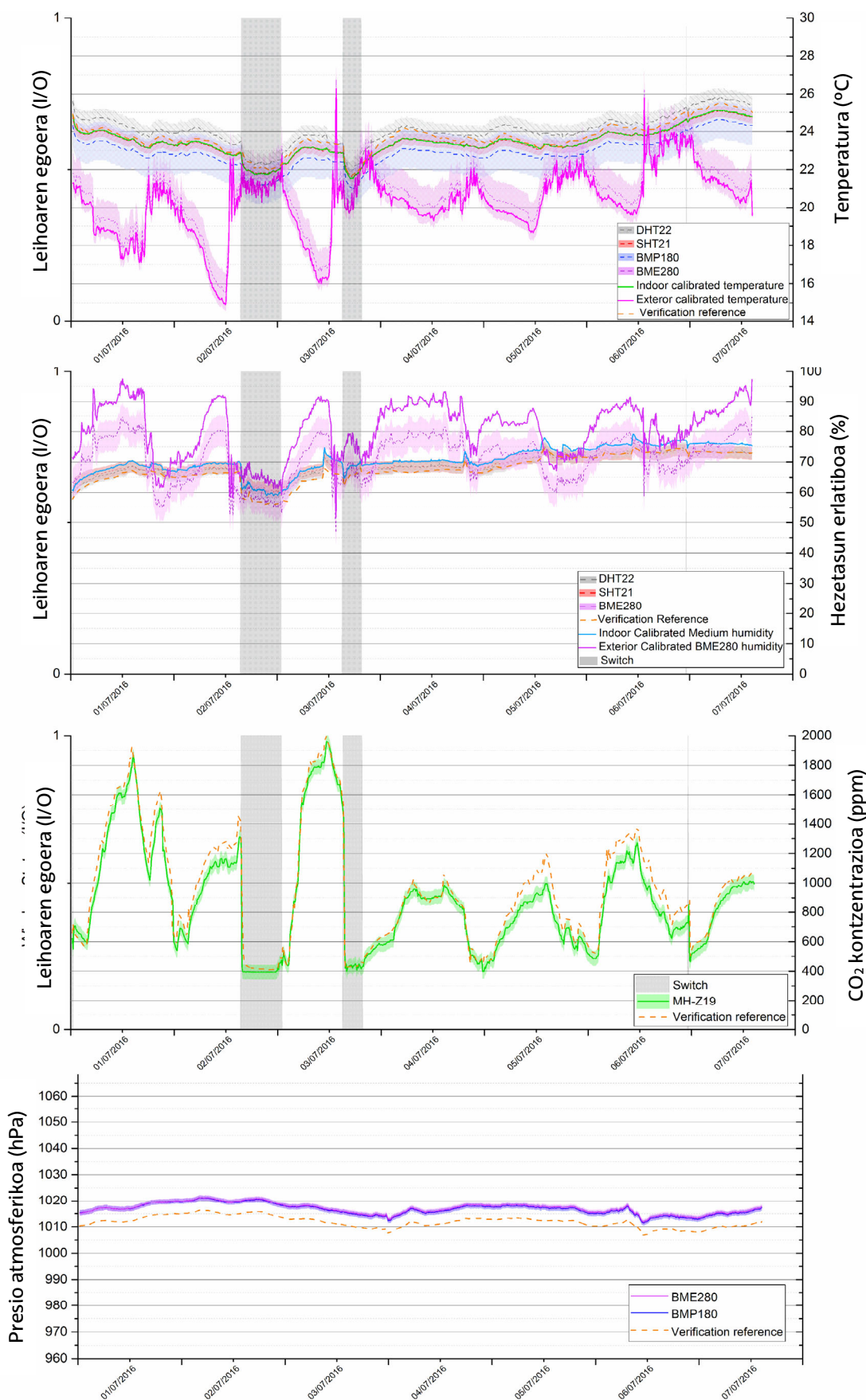


honetan lortutako emaitzen eta prototipoaren eta sistema komertzial batekin lortutako erregistroen arteko konparaketa egiten da bere egiaztapenerako. Bigarren atalari dagokionez, lortutako emaitzetan oinarrituta, sentsoreek aurkeztutako erantzunean zentratuko da. Honen helburua etorkizuneko ikerketarako zein sentsore izan liteke egokiena zehaztea da. Azkenik, prototipoa oro har harturik, honen inguruko eztabaida egingo da monitorizazio sistemen gai garrantzitsuenei dagokionez. Lehen aipatutako bateriaren bizitza, datuak gordetzeko ahalmena eta ekipamenduaren kostua puntu oso garrantzitsuak dira erabaki bat hartzeko eta horregatik, arreta eman zaio gau honi atal honetan.

5.4.1. Emaitza orokorrek eta egiaztapena

Erregistratutako tenperaturei dagokionez, erregistratzen duten 4 sentsore daude, horietako 3 barruko baldintzetarako erabili dira (DHT, SHT21 eta BMP1280) eta bestea kanpokoetarako (BME280). Garatutako sistemaren funtzionamendu egokia egiaztatzeko erabili den ekipamendu komertziala apartamentu barruan kokatu da. Sistema hau HT-2000 modeloa da. Honek SHT30 sentsorea erabiltzen du tenperatura eta hezetasuna neurtzeko, eta OGM-220 sentsorea CO₂ kontzentrazioa neurtzeko. Bi sentsoreak prototipoan erabilitakoen oso antzekoak dira, beraz, neurketak egiteko tresna apropos bat kontsideratu daiteke. Bestalde, sistema honek ez du presio atmosferikoa neurtzeko aukera ematen, beraz helburu honetarako, eraikinaren ondoan dagoen (2.4 km) estazio meteorologikoa hartu da erreferentzia bezala. Estazio honetako modeloa Davis Vantage Pro2 Plus da.

Lortutako emaitza 5.7.irudian aurkezten dira. Grafikoan sentsore bakoitzak neurtutako tenperatura agertzen da eta sentsore bakoitzaren errore-banda. Sentsoreei dagozkien bi balio gehigarri erantsi dira kalibraketa kurba aplikatu eta gero. Alde batetik, kanpoko sentsorearen kasua gehitu zen eta bestetik, barruko sentsoreen batzbestekoa. Prototipoarekin lortutako balioei dagokienez, etxe barnealdean erregistratutako batzbesteko tenperatura 23.43 °C-tan egon da, 21.53 °C eta 25.10 °C-eko muturreko balioekin. Kanpoko baldintzei dagokienez, batzbestekoa balioa 20.25 °C-koa da, 14.90 °C gutxieneko balioa izanik eta 26.28 °C gehienekoa.



5. 7. Irudia- Erregistratutako balioak garapen-propioko gailuarekin eta egiaztapen ekipamenduarekin.



Bestalde, tenperatura balioekin bezala, lortutako hezetasun erregistroak bere errore-bandekin irudikatu dira eta balio zuzenduak gehitu dira kalibraketa eta gero. BME280 lortutako kanpoaldeko baloreei dagokionez, neurketetan dauden desberdintasun handiak islatzen dira. Hezetasun balio maximoa %97.48koa da eta minimoa %51.70, batazbesteko %80.80 izanik. Honek argi eta garbi adierazten du eguneko epearen eta hezetasun erlatiboaren arteko elkarrekikotasuna. Hau da, hezetasun erlatiboaren gailurrak gauean tenperatura jaisten denean gertatzen dira, eta hezetasun erlatibo jaitsierak eguneko tenperatura igotzen denean. Oro har, argi geratzen da hezetasun altuak, aztertzen ari garen klima ozeanikoaren ezaugarria dena, etxe barnealdean eragina duela. Etxe barnealdean hezetasun erlatibo altua dago eta honek etxearen erosotasun limitetik gertu egotea eragiten du, airearen hezetasuna kentzen duen aire girotuko sistemaren falta dela eta. Ondorioz, batazbesteko %70.62-ko balioa lortzen da, %79.07-ko maximoarekin eta %59.02-ko minimoa.

MH-Z19 sentsoareekin erregistratutako BAKaren balioak, monitorizatutako denboraldian zehar batez besteko kontzentrazioa 889 ppm-koa da, BAK onargarria islatuz. Ikusi daitezkeenez, zenbait gailurrek gomendatutako 1000 ppm-ko limitea gainditzen dute [52,53], 1961 ppm-ko maixmoak aurkeztuz. Neurketak udaran egin direla kontuan hartu behar da. Monitorizazioa berokuntza epean zehar egin izanez gero balio hauek altuagoak izango lirateke, egoera okertuz etxea estufa berogailu bat erabiltzeagatik. Bere errekontzak CO₂ kontzentrazioa igotzeaz gain, hezetasun erlatiboa igotzen du eta airean dagoen oxigeno kantitate murrizten du, etxeko erosotasun baldintzak nabarmenki murriztuz.

Azkenik, etxe barruko eta kanpoko presio atmosferikoko balioak aurkezten dira. Ikusi daitezkeenez, ez dago desberdintasunik bi balioen artean bi sentsoareak altitude berean baitzeuden, eta etxean ez dago inongo aireztapen mekaniko konstanterik kanpoaldearekiko presio desberdintasuna sortzen duena.

Garatutako sistemaren portaera ekipamendu komertzialarekin alderatuta, bien balioak oso antzekoak dira presio atmosferikoaren salbuespenarekin, 5.7. Irudia. Azterketa estatistiko deskribatzaileak, 5.1.Taula, prototipoaren eta ekipamendu komertzialaren balioen arteko diferentziak sentsoarearen errore marjinan daudela erakusten du, CO₂ aldagaiaren eta lehen aipatutako presio atmosferikoaren balioak izan ezik. CO₂ balioei dagokienez, prototipoaren sentsoarekin ingurumenarekin kontaktu zuzenean daude, HT-2000 ekipameduarenak berriz, ekipamenduaren estaldura barruan daude, airearen zirkulazioko saretak dituenak, eta ondorioz, bi sistemen esposizioa ez da berdina. Erregistratutako diferentzia maximoak eta minimoak balio bereziak aurkezten dituzte denbora tarte laburretan, hala nola, leihoa

irekitzen denean, eta ondorioz, ez dira hain adierazgarriak desbiderapen estandarrean ikusten den bezala. Bestalde, presio atmosferikoaren balioetan, estazio meteorologikoaren kokapena kontuan hartu behar da, izan ere, ez zegoen ekipamendu komertzialeko sentsorearen kokapen berdinean. Bi kokapenen artean 44 m-ko altitude desberdintasuna zegoen. Lehen aipatutako barruko eta kanpoko batez besteko tenperaturak hartuz, 23.43 °C eta 20.25 °C hurrenez hurren, bi puntuetan neurtutako batezbesteko presioen arteko desberdintasuna, 5.1. Taula, altitude desberdintasunarekin bat dator.

5.1.Taula- Garapen propioko eta ekipamendu komertzialekin neurtutako aldagaien azterketa estatistikoa.

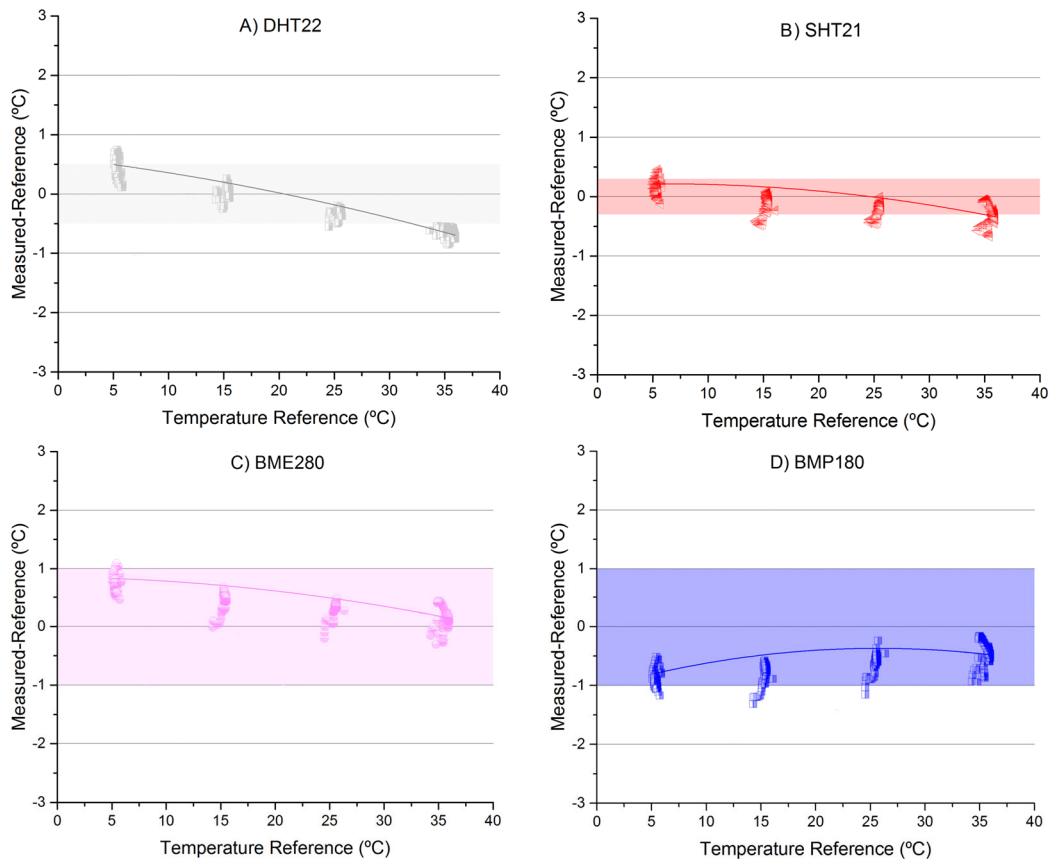
	Temperatura (°C)	Hezetasun erlatiboa (%)	CO ₂ kontzentrazioa (ppm)	Presio atmosferikoa (hPa)
Batez bestekoa	0.249	-3.006	68.568	5.160
Minimoa	-0.132	-7.375	-304	4.574
Maximoa	0.618	-0.998	489	5.744
Mediana	0.244	-2.950	57	5.165
Desbideratze estandarra	0.136	0.628	61.620	0.191
Balidazio erreferentziaren zehaztasuna	± 0.6	± 3	± 50	± 1.0

Oro har, emaitzek erakusten dute apartamentuaren portaera eraikuntzaren tipologiaren eta klimaren araberakoa dela. Hau da, kanpoko tenperatura moderatua eta hezetasun erlatibo handia, aipatu bezala, barruko baldintza higrotermikoetan eragin handia du. BAK-k CO₂ kontzentrazio arruntak aurkezten ditu eraikuntza tipologia honetarako, non aireztapena fenomeno naturalengatik sortzen da. Nabarmendu beharreko puntua leihoa irekitzearen eragin argia da *switch* motako sentsoreak erakusten duen bezala. Hau kutsatzaile kontzentrazio gailurretako 3 kasutan islatzen da (2016/07/02, 2016/07/03 eta 2016/07/06), leiho irekitzearekin orekatu zirenak eta barruko airearen kalitatearen hobekuntza azkarra 400 ppm-ko kontzentrazio inguruan. Ondorioz, erabiltzaileak sistema ondo erabili eta neurri hori eraginkorra izan arren, barruko tenperatura 1 °C jaisten da. Jaitsiera honek udaran barruko egonkortasuna hobetu dezake, baina berokuntza denboraldian zehar erosotasunean jaitsiera bat suposa dezake eta energia galerak eragin ditzake. Gainera, sistema komertzialarekin egindako egiaztapenarenari esker, garatutako prototipoak ikerketa astean zehar portaera ona erakusten zuela kontsideratu daiteke. Tenperatura eta hezetasun balioak esperotako limiteen barruan zeuden. Era berean, presio atmosferikoaren neurketak ados zeuden estazio meteorologikoaren erregistroekin altitude desberdintasuna kontsideratuz. CO₂-aren balioak soilik espero zen errorearen gainera zeuden, segur aski bi sistemen estalduraren diferentziagatik eta sentsore mota honen sentsibilitate handiagatik. Hala ere, emaitza hauek kontutan

hartuta, garatutako prototipoa ingurumenaren monitorizazioa aurrera eramateko sistema egokia dela esan daiteke.

5.4.2. Sentsoreen emaitza konparatiboak

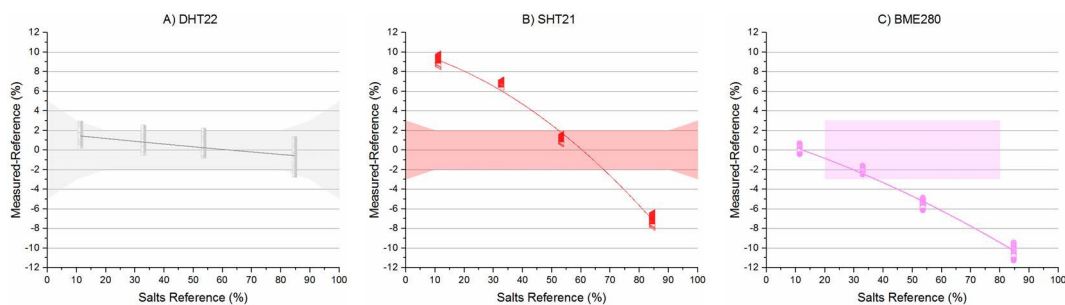
Orain, erabilitako sentsoreen azterketa konparatiboa egingo da. Soilik temperatura eta hezetasun sentsoreak konparatuko dira, izan ere, zenbait modelo erabili dira eta kalibratuak izan dira.



5.8. Irudia- Kalibratzeko prozesuan lortutako temperaturako erroreak eta fabrikatzaileak adierazitako sentsoreen errorearen arteko konparazioa.

5.8. Irudian temperatura neurtzen duten lau sentsoreen portaera aurkezten da erreferentziako sentsorearekin alderatuta kalibratze prozesuan. Grafikoetan kalibratutako erreferentziaren eta fabrikatzaileak adierazitako sentsore bakoitzaren erroreak kontuan hartzen dira, itzalekin islatzen direnak. Oro har, ikusi daiteke errore gehienak esperotako limiteen barruan daudela. Hala ere, 35 °C-ko kalibraketa muturrean DHT22 eta SHT21 sentsoreek erregistratutako puntuak esperotako errorea baina handiagoak dira. Bestalde, aipatu beharra dago BMP180 eta BME280 sentsoreak presio atmosferikoa neurtzeko sentsore espezifikoak direla. Hauek temperaturaren balioa presio atmosferikoaren neurketa zuzentzeko erabiltzen dute, eta horregatik, bere ± 1 °C-ko zehaztasuna beste bi sentsoreena baina baxuagoa da. Hala ere, beren portaera esperotako tartean dago.

Sentsoreen portaera hezetasunari dagokionez, 5.9.irudian neurketen errorea azaltzen da erreferentziako gatzekin alderatura eta, aurreko kasuan bezala, fabrikatzaileek emandako errore tolerantzia itzalekin islatzen da. Erabilitako DHT22 sentsoreak portaera fidagarria erakutsi du egindako azterketan. Lortutako erroreak fabrikatzaileak adierazitako errorean marjinetan aurkitzen dira. Bestalde, SHT21 eta BME280 sentsoreek, grafikoetan ikus daitezenez, fitxa teknikoetan zehaztutako erroreekin zerikusirik ez duten portaera aurkezten dute. Nahiz eta SHT21 sentsorea %53.3-ko hezetasunean fidagarria izan, portaera antagonikoa izan du gainontzeko balioetan, BME280 sentsorea bezala %32.9-ko hezetasunean. Hala ere, kalibraketa prozesua eta gero, posible izan zen desbideraketa hauek zuzentzea eta emaitza koherenteak lortzea.



5. 9. Irudia- Kalibratzeko prozesuan lortutako hezetasun erlatiboaren erroreak eta fabrikatzaileak adierazitako sentsoreen errorean arteko konparazioa.

Lortutako emaitzek portaera zuzena aurkezten dute tenperatura neurketetan, baina zenbait ustekabe hezetasunari dagokionez. DHT22 sentsorea izan da sentsore bakarra tenperatura eta hezetasunerako balio egokiak eskaini dituen kalibraketarik gabe, eta honek sentsore hau aplikazioa honetarako egokia dela adierazten du. Hala ere, desabantaila nagusietako bat mikrokontrolagailuarekin komunikatzeko metodoarekin lotuta dago. Wire protokoloa erabiltzen du, beraz, mota honetako sentsore bakoitzak mikrokontrolagailuarekin konektatzeko sarrera konexio bat behar du eta hau arazo bat izan daiteke sarrera asko behar diren proiektuetan.

Bestalde, I²C komunikazio protokoloa erabiltzen duten hiru sentsore gehiago daude eta honek sentsore asko paraleloan konektatzeko aukera eskaintzen du sarrera digital gehiago behar gabe. Hezetasunaren kalibraketa prozesuan, SHT21 eta BME280 sentsoreek erreferentziako gatzekiko emaitza desberdinak erakutsi zituzten. Hala ere, kalibraketari esker lortutako emaitzak biltzea posible izan zen. BME280-aren abantaila bat presio atmosferikoaren neurketa ahalbidetzen duela da eta honek SHT21 baina osatuagoa bihurtzen du. Hala ere, kontuan hartu behar da BME280 tenperatura eta hezetasuna neurtzeko sentsore espezifiko da eta BMP180-ak bezala, tenperatura erabiltzen du presio atmosferikoaren neurketa zuzentzeko. Horregatik,



bi sentsoreen temperatura neurketaren zehaztasuna SHT21-arena baxuagoa da, bereziki temperatura eta hezetasunaren neurketak.

Ondorioz, lortutako emaitzak kontuan hartuta, sentsorearen hautaketa aplikazioaren eta beharrezkoa den doitasunaren arabera izango da. DHT22 sentsoreak errendimendu onena erakusten du eta ezin hobea da neurketa puntu gutxiko proiektuetan, izan ere, sarrera digital bat behar du sentsore bakoitzeko. SHT21 zehaztasun handiagoko aplikazioetan erabili daiteke, baina hezetasunaren kalibraketa maiztasun handiagoarekin egin beharko litzateke. Bestalde, BMP180 edo BME280 presio atmosferiko eta temperatura sentsore gisa erabili daitezke zehaztasuna funtsezkoa ez den kasuetan. Hiru parametroen monitorizazioa eta zehaztasun handi behar den proiektuetan, DHT22 edo SHT21 motako sentsore espezifikoa erabiltzea gomendatzen da presio sentsore batekin konbinatuta.

Kontuan hartu behar da ikerketa honen helburu nagusia apartamentuaren monitorizazioa dela eta ez sentsore desberdinen analisi zehatza. Hala ere, aurrera eramanez azterketak posible egin du sentsore desberdinen portaera desberdina konparatzea eta honela ikertzaile batek une jakin batean aurki ditzakeen egoerak islatu ditu. Konparaketa zehatzago bat aurrera eramateko eredu bakoitzeko sentsore gehiago erabiltzea beharko lirateke. Honen bidez analisi erakusgarriago bat lortuko litzateke eta portaera berezia izango lituzketen sentsoreak baztertzea ahalbidetuko luke. Hala eta guztiz ere, lortutako emaitzek argi eta garbi islatzen dute beharrezkoa dela aurreko kalibraketa bat eta rekalibraketa beharrezko maiztasunarekin. Hau egitearen arrazoia, lehen aipatu den bezala, denboran zehar hezetasun sentsoreetan gertatzen den portaera aldaketa da.

5.4.3. Prototipoaren analisisia

Azterketa honen zehar ikusi den moduan, 5.3.2 *Prototipoaren garapena* atalean helburu gisa ezarri diren eskakizunak bete dira. Azpimarratu beharra dago zenbait aurkikuntza azaldu direla, bere garrantziagatik monitorizazio prozesuetan, eta ondorioz, SICB eremuan.

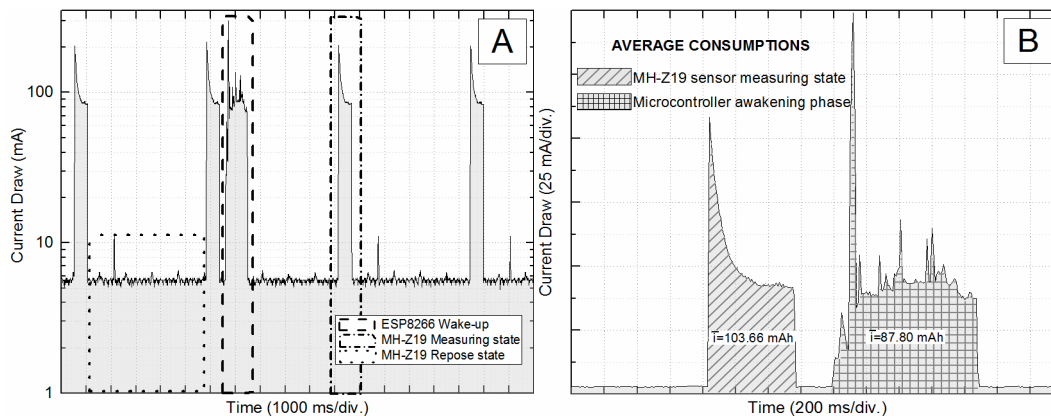
Betekizun garrantzitsuenetakoa haririk gabeko konexioa edota energia hornidura galduz gero, datuen erregistroaren segurtasuna zen. Energia hornidura ez dagoenenean bateria bizitza handiago edo txikiagoa izatea eta datuen bilketan eskaintako segurtasuna edukitzea energia kontsumoaren arabera izango da. Garatutako ekipamendua segurtasun hornidura sistema batez hornituta zegoen etengabe. Horretarako, *power bank* bat ezarri zen energia hornidurarekin konektatuta zegoena eta aldi berean monitorizazio ekipamenduarekin. Energia hornidura ez izatekotan, diseinu honek 2200 mAh-ko biltegitzea ahalbidetzen zuen

power bank-etik. Bateriaren iraupena ahalik eta gehien luzatzeko, sistemaren energia optimizazioa egitea beharrezkoa izan zen eta horretarako beharrezkoa zen mikrokontrolagailua "sleep" eta "wake it up" moduen artean aldatzea. Hau posible izan zen ESP.deepsleep programazio komandoaren bidez. Modu honetan kontsumo handiak neurtzean eta datuak bidaltzean gertatzen dira eta gainontzeko denboran zehar sistema hibernazio moduan dago.

Ekipoarekin energia kontsumoa egiaztzeko, korrante neurketak egiteko beste tresna bat garatu zen IIP-an (OSP) oinarrituta. Horretarako, zehaztasun handiko 16 bit-eko bihurtgailu analogiko-digital (ADC) bat gehitu zen. Modeloak, ADS1115, bereizmen handiko tentsio neurketak lortzea ahalbidetu zuen. Gainera, 1 -ko erresistentzia gehitu zitzaion seriean monitorizazio ekipamenduaren energia hornidurari eta tentsioaren beherakada neurtu zuen ekipamenduak. Erabilitako erresistentzia 1 -koa zenez, Ohm'en legearen arabera, tentsio neurketak zirkuituko korrante fluxuarekin bat zetozen.

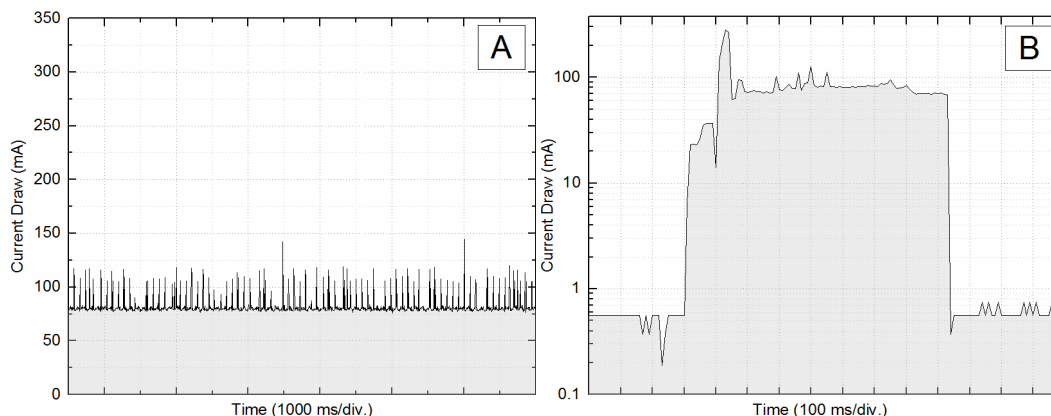
Neurketak egiteko, korrante elektrikoa erregistratu zen 50 min zehar 10 ms-ko tartearekin neurketen artean. Erregistratutako belioen batezbesteko kontsumoa 15.54 mAh-koa izan zen. Datu hauen ikerketa sakonagoa eta kontsumo eredia ezartzea eta hiru kontsumo fase desberdintzea ahalbidetzen du, 5. 10. Irudian ikusi daitezkeenez. Lehenengoak kontsumo baxuena du, batezbesteko balio 5.65 mAh izanik 4770 ms-ko iraupenean zehar. Denbora horretan zehar mikrokontrolagailua "sleep" moduan dago, baina MH-Z19 sentsorea atsedendian dago eta hemen kontsumo parasito bat sortzen du. Egoera 5 s-ro gertatzen da. Bigarren fasean mikrokontrolagailua lo jarraitzen du baina CO₂ sentsore piztuta dago, 225 mAh-ko kontsumo maximoak emanek eta jaisten doa 88 mAh-ra iritsiz. Fase honek 103.66 mAh-ko batezbesteko kontsumoa du 530 ms-ko epean zehar. Azkenik, hirugarren fasean mikrokontrolagailua esnatzen da. Epe honetan zehar sentsore guztien neurketa hartzen ditu, WiFi bidez bidaltzen ditu eta microSD-an gordetzen ditu. Fase honen iraupena 890 ms-koa da eta batezbesteko kontsumoa 87,80 mAh-koa da. Hirugarren fasea konfiguratutako erregistro tartetean gertatzen da, garatutako kasuan 10 min-ro. Bestalde, lehenengo eta bigarren faseak etengabeak dira monitorizazio prozesuan zehar. Beraz, garatutako ekipamenduaren kontsumoa denboraren arabera neurketa tartetean, $t(s)$, espresio honen bidez definitu daiteke (1):

$$\bar{I}(t) = \frac{\left(\frac{103.66 \text{ mAh} \cdot 0.53 \text{ s} + 5,65 \text{ mAh} \cdot 4.77 \text{ s}}{5.3 \text{ s}} \right) \cdot (t - 0.89) + (87.80 \text{ mAh} \cdot 0.89 \text{ s})}{t}$$



5. 10. Irudia- Monitorizazio prototipoaren korrante elektriko kontsumoaren analisia: A) Detektatutako patroikontsumo orokorra B) Batez besteko kontsumoaren zehaztasuna mikrokontroladorea esnatzen denean eta MH-Z19 sentsoreak neurtzen duen unean.

Neurketa hauen arabera, autonomia oso mugatua zegoen CO₂ sentsorearen funtzioamenduagatik eta bere kontsumo parasitoagatik. Hau etengabe piztu behar da emaitza koherenteak lortzeko eta ondorioz, ez zen posible izan kontsumo baxuagoko programazio kodea garatzea. Aurretik erregistratutako batezbesteko 15.50 mAh-ko kontsumoarekin 2200 mAh-ko power bank-ek ekipamenduari 141 h-ko autonomia emango lioke.



5. 11. Irudia- Mikrokontroladorearen kontsumoa deep sleep moduaren aktibazioaren arabera: A) Aktibatua B) Desaktibatua.

Nahiz eta "deep sleep" moduaren aplikazioak energia kontsumoa nabarmenki jaitsti, ez da ondo bereizi aurreko prototipoarekin. Ikusitako moduan eta adibide gisa, CO₂-ko sentsorea baztertuz, kontsumo baxuko pregramazio kode bat aplikatzean sistemaren etengabeko kontsumoa 0.56 mAh-ra jaitziko litzateke "deep sleep" moduarekin, 5.11. Irudia. Hasierako sisteman bezala, kontsumo maximoak erregistroko unetan gertatuko lirateke eta sentsorearen balioak 880 ms-z bidaliko lirateke, honela, batezbesteko kontsumoa 83.79 mAh-tik 0.73 mAh-ra jaitziz 10 min-ko neurketa tartearrekin. Modu honetan energia autonomia 26 h-tik 3013 h-ra igoko litzateke power bank-arekin.

Bestalde, haririk gabeko konexioaren galera posibleari dagokionez, kodea garatu zen arazo hau kontuan hartuta. Helburu honetarako, mikrokontrolagailua zerbitzari konexioaren programazio lerroan dagonenean eta konektatzen ez denean, automatikoki agindua saltatzen du, aurrera doan kodearekin jarraitzen du, sentsoreen datuak gordetzen ditu eta berriro hasten da "loop"-arekin.

Aurretik aipatutako datuen biltegitze ahalmenari dagokionez, nahiz eta gaur egungo ekipo komertzialen ahalmena zabaltzen ari den, kasu gehienetan eskainitako biltegitze ahalmena baxua da eta ondorioz beharrezkoa da datuak aldiro "in situ" gordetzea eta memoria berrezartzea. Gainera, aipatu beharrezkoa da monitorizazio kanpainetan epe luzeetan zehar neurtu behar dela nolabaiteko maiztasun handiko tarteekin (1-60 min), eta honek datuen bolumena eta biltegitze ahalmena nabarmenki handitzen ditu.

Garatutako prototipoaren biltegitze tamaina gorde beharreko zutabe zenbakien araberakoa da (neurketa aldagaiak). Adibide gisa, ebaluatutako kasuak 11 sentsoreen zutabe balioak zituen monitorizaturiko epean zehar 10 min-ko tartearekin neurketen artean eta sortutako .txt fitxategiak 62 kB zituen. Proiektuan 8 Gb-eko microSD bat erabili zen, beraz beharrezko espazioa biltegitze ahalmena baina askoz txikiagoa zen. Gainera, microSD irakurgailuak 32 Gb-eko txartelak konektatzeko gaitasuna du, eta lehen aipatutako biltegitze arazoak konponduko lirateke eta aldiro datuak gordetzeko eta memoria berrezartzeko beharrak desagertuko lirateke.

Azkena, baina ez horregatik ez hain garrantzitsua, kostua aurre egin beharreko beste erronketako bat zen Ingurumen Adimentsuetan. Ekipamenduaren kostua faktore nagusia da neurketa ekipamenduan inbertitzeko orduan [26]. Berrikuspen berak ere adierazten du "inplementazio erraztasuna" dela funtsezko faktoreetako bat monitorizazio irtenbideen hautaketan eta haririk gabeko sentsoreek instalazio kostuak jaisten dituztela eta malgutasun handia eskaintzen dutela azpimarratzen du. Lehen aipatutako ikertzaile askok [15,16,19,54] kode irekiko sistemen kostu baxuagoa nabarmentzen dute. Alderdi hau oso baliagarria izan daiteke ekipo zientifikoak erosteko kostuak oso altuak direnean aplikazio eskalan. Hau da Jáñez Moran et al [55] kasua. Honek Europako proiektu multzo batetik lortutako emaitzak aztertu zituen. Proiektu hauen helburua IKT-aren aplikazioaren bitartez eraikuntza pilotuetan energia kontsumoa jaitea zen. Bere analisi ekonomikoak adierazi zuen ekipamenduaren instalazioaren kostuak 300 €-tik 1000 €-raino joan daitezke eraikuntza bakoitzean eta 6,25 €/m² eraikin tertziarriotan. Azkenik, ikerketak eskalako politikak egitearen eta ekipamenduaren kostuak jaistearen garrantzia azpimarratzen du.



Garatutako sistemak 90 €-ko inguruko kostua du. Hala ere, aldagai berdin zenbait sentsoreen bidez neurtu zen, izan ere, helburuetako bat haien arteko konparaketa egitea zen. Adibide gisa, tenperatura eta hezetasuna neurtzea beharrezkoa balitz, prezioa 50 €-koa izango litzateke, eta presio atmosferikoa neurtzekotan 55 €-koa. Garatutako sistemaren prezioa beharrezkoak diren "oinarrizko" elementuen arabera da, hala nola, mikrokontrolagailu plaka, OLED pantaila, microSD memoria, energia hornidura edo material lagungarri suntsikorra. Sentsore gehigarriek ia ez dute prezioa handitzen. Pearce-ren arabera [15], garatutako tresnaren konplexutasun handitzen den heinean, lortutako aurrezkiak ekipo komertzial batekin konparatuta handiago dira.

Aurkeztu zen bezala, monitorizazio sistemen arazoak garatutako sistemaren bidez konpondu ziren. Konexio hutsegiteak, bateria autonomia baxua, ekipamedua erostearen kostu altua eta biltegiatze ahalmen txikia jada ez dira oztopo Ingurumen Adimentsuetan. Ondaoriotzatu daiteke IIP-aren eta GI-aren arteko konbinazioa metodo berritzaile bat izan liteke monitorizazio proiektuetan abantaila argi bat aurkezten duena.

5.5. Ondorioak

Ikerketa honetan IIP eta GI plataformetan oinarritutako sistema bat garatu da eraikinen ingurumen baldintzak monitorizatzeko. Ondoren, jarraitu den metodologia aurkeztu da, garatutako sistemaren diseinua eta monitorizatutako aldagaien emaitzak, horien analisia garatuz. Azkenik, zenbait alderdi garrantzitsu azpimarratu dira, hala nola, energia kontsumoa, garatze kostuak eta prototipoaren datu biltegiatzea.

Proba denboraldian lortutako emaitzek garatutako sistemaren errendimendu ona frogatu da. Tenperatura eta CO₂ sentsoreen erabilera konbinatuarekin leihoko sentsorearekin, BAK-an influentzia zuzena erakutsi da erabiltzaileen leihoko erabileraren arabera. Emaitzek erakutsi dute hezetasun sentsorearen kalibrazioa funtsezkoa izan dela balio koherenteak lortzeko. Bestela, bere hasierako portaerak desadostasunak eta zehaztugabeak agertuko lituzke.

Bestalde, plataforma hauek ahalbidetzen dute maiz monitorizatzeko gailuak erabiltzen duten ikerketa taldeek aplikazio indartsuak eta polifazetikoak garatzeko posibilitatea. Hasierako zailtasunek, teknologia guztiz menderatuta ez edukitzeagatik, ikerlaria etsiarazi dezaketen, baina aplikazioak garatu eta emaitzak lortu direnean, ikuspuntua erabat aldatzen da, kontuan hartu beharreko alternatibak bihurtzen delarik. Horregatik, tresna hau oso erabilgarria izan daiteke datuak erregistratu eta prozesatzen dituztenentzako. Monitorizazioa eta prozesuen kontrola

zeregin arruntak dira ikertzaileentzako. Hortaz, tresna hauen erabileraren oinarritzko ezagutzak beste modura batean egin ezingo ziren proiektuak bultzatu ditzake.

Nabarmendu beharreko beste abantailetak bat plataformek ahalbidetzen duten askatasuna da. Nahiz eta komertzialki posible izan parametro bat neurtzeko ekipamendua lortzea (CO₂, fluxua...), oso zaila izango litzateke ekipamendu horretan parametro desberdin aldi berean neurtzea eta erregistroak haririk gabe bidaltzea ere. Proiektu honetan, ez da izan posible hedaketa azkarreko ekipamendu eramangarri bat aurkitzea arrazoizko prezio batera tenperatura, hezetasuna eta CO₂ kontzentrazioa neurtzeko WiFi konexioarekin. Prototipo honen bitartez, posible izan da arazo hau konpontzea eta neurtzeko ahalmena handitzea beste aldagai batzuekin, hala nola, presio atmosferikoa edo leiho irekitze sentsorea.

Lan honen garapenak etorkizuneko ikerketak burutzeko bidea ireki du, monitorizazio prozesua hobetzeko eta ondorioz SICB eremua. Denbora errealeko irudikapen panelak, hala nola, *Google Data Studio*, datuen aurkezpen grafikoa ahalbidetuko du eta tresna errazago bat eskainiko du. Mota honetako tresnek erabateko bateragarritasuna dute lan honetan aurrera eramandako metodologiarekin, beraz bere aplikazioa oso interesgarria izango litzateke.

GI-an oinarritutako tresnak garatzea kontuan hartu beharreko erronka eta arazo berriak dakartza. WiFi sareen konexioaren egonkortasuna puntu nabarmenetako bat da. Distantzia handiek edo igorlearen eta hartzailearen arteko oztopoek haririk gabeko konexioa eragotzi dezakete. Kanpoko antenen erabilera osagarriak, programazio kodearen egituran hobekuntzak edo GI protokolo alternatiboak erabiltzea problema honen konponbidea izan daiteke. Gainera, GI-ra konektatutako gailu adimentsuen igoerak hazten ari den kezka bat dakar, segurtasuna eta pribatutasuna. Puntu hauek ez badira kontuan hartzen, irisgarritasuna, osotasuna, konfidentzialtasuna eta nortasunaren lapurretarekin loturiko arazoak egon daitezke. Horregatik, garatutako gailuek SSL estandarrean oinarritutako plataformek bezalaka pribatutasuna eta segurtasuna eskaini behar dute, izan ere, datuak transmisio prozesuan zehar enkriptatuta daude. Bere garrantziarengatik eta arlo honetan dauden konponbideengatik, oso interesgarria izango litzateke hurrengo lanetan ikerketa honetan garatutako gailuentzako konponbideak aurkitzea.

Gainera, zarata kontuan hartu beharreko faktore garrantzitsu bat da. Sentsore analogikoak zaratari oso sentikorrek dira, izan ere, neurketan zehar sortzen dituzten aldakuntzak oso baxuak dira, mV-etako mailan. Ondorioz, ingurumeneko edozein interferentziak balioa distortsionatu dezake. Alderantziz, seinale digitalek balio "altu" eta "baxuekin" lan egiten dute eta horregatik seinale distortsionatzeko zaratek anplitude handi eduki behar dute. Hori dela eta, sentsore digitalek ez dute zarataren



hainbesteko eragina jasaten. Garatutako monitorizazio gailuak sentsore digitalak ditu soilik. Modu honetan, zarataren arazoa nabarmenki murrizten da eta ez dago honen efekturik emaitzetan. Gainera, interesgarria izango litzateke hurrengo ikerketetan teknika desberdinak erabiltzea, hala nola, filtrazio algoritmoak, programazio kodean. Honela, seinaleak izango lukeen zarata moteldu liteke. Energia hornidurari dagokionez, hainbat probek erakutsi dute zenbait korrante egokitzailiek zarata sortzen dutela, neurketetan eragina izanik. Horregatik, puntu hau kontuan hartu beharko litzateke etorkizuneko lanetan.

Azkenik, lan honetan aldagaiak sentsore mota jakin batekin neurtu dira. Alabaina, frogatu da konponbide hau Hiri Adimentsu eta bere SICBetarako beharrezkoak diren beste sentsore (termoparak, bero fluxu sentsoreak,...) eta eragingailuak (errele, berogailuak, LEDak...) eskalatzeko gai dela, honek bidea irekitzen du etorkizuneko eraikin arloko garapenetan.

Beraz, emaitzen analisi orokorra aztertu ondoren, kapitulu honekin lotu diren ondorio zehatzak honako hauek dira:

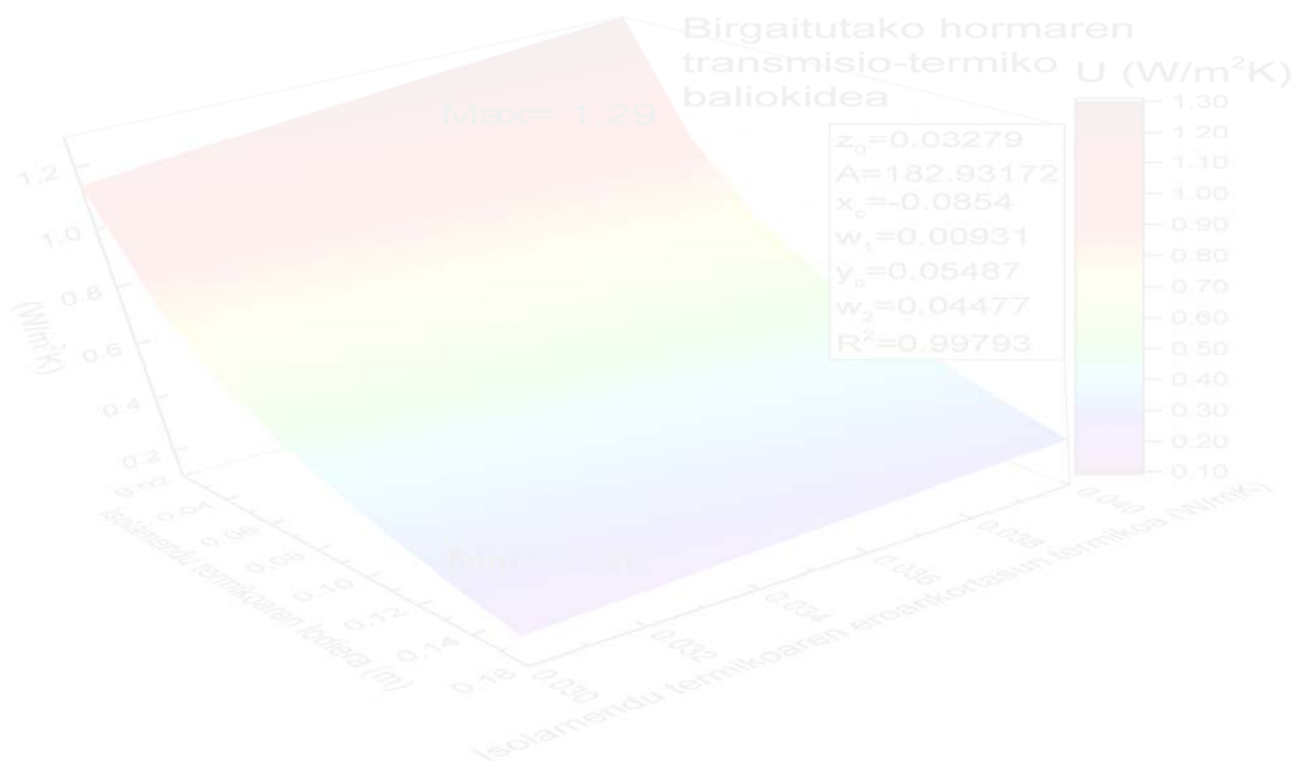
- Iturburu Irekiko Plataformak (IIP) eta Gauzen Interneta (GI) gorakada ari diren teknologiak eraikinen monitorizazioetarako gailuak garatzeko tresna onak izatea frogatu dute.
- Proposatutako metodologiak garapen libreko monitorizazio gailuak garatzeko aukera eman du. Era honetan, kostu baxuko eta proiektu bakoitzaren behar zehatzen araberrako monitorizazio ekipamenduak garatzeko posibilitatea eskaintzen da.
- Azterketa kasuaren bidez, garatutako monitorizazio gailua erantzun zuzena frogatu du monitorizazio iraupenean zehar. Gainera, lortutako emaitzak erantzun egokia erakutsi dute ekipamendu komertzialekin garatutako egiaztapenaren arabera.

VI. Kapitulua

Capítulo VI

Ondorioak, ekarpenak eta etorkizuneko ikerlanak

Conclusiones, contribuciones y futuras investigaciones



Laburpena:

Azken kapitulu honetan, Doktorego Tesiaren ondorio nagusiak biltzen dira. Horrez gain, ikerketa honetatik eratorritako ekarpenak eta etorkizuneko ikerketa ildoen proposamenak gehituko dira.

Resumen:

En este último se capítulo recogen las conclusiones principales de la Tesis Doctoral. Además se añaden aquellas aportaciones derivadas de la presente investigación así como la propuesta de futuras líneas de investigación.

6.1. Ondorio nagusiak

Doktorego Tesi honetan garatutako lana ahalbidetu egin du eraikitako ondarearen energia eraginkortasunari buruzko egoera erreala aztertzea. Ikerketa eremuaren azterketaren bidez ebaluatutako eraikin tipologiaren portaera termikoaren hainbat alderdi erabakigarriak zehaztea posible izan da.

Burututako saiakuntzei esker, eremu-datuak lortzeko aukera lortu da eta horrela hurrengo fasean birgaitze energetikoen esku-hartze proposamen ezberdinen azterketa garatzea.

Ikerketa honetan garatutako lana I. kapituluan ezarritako galderari erantzuna emateko aukera eman dute:

Zein da eraikitako ondarearen energia kontsumoaren egoera erreala eta zein dira parametro garrantzitsuenak kontsumorako?

I. eta II. kapituluetan aztertu egin da eraikin mota honi buruzko informazio falta nabaria dela energia arloan dagokionez. Horren ondorioz eta eraikinen birgaitze energetikoaren garrantzia dela eta, nazioarteko ikerketak eta proiektuak hasi dira garatzen eraikitako ondarearen eraginkortasun maila aztertzeko. Gainera, argitaratu berriko europar araudiak garrantzi handia eman dio arlo honen inguruko ikerketen garapenari.

Eraikin mota bakoitzak behar duen energia barruko baldintza termikoak mantentzeko bere ezaugarri termikoen arabera denez, eragina duten parametroen karakterizazioa garrantzitsua da. Doktorego Tesi honek inguratzaile



termikoaren esku-hartzea helburu bezala duenez, ikerketa hau eraikinen osagai pasiboetan eragina duten parametroen ikerketan oinarritu da.

Azterketa eremuan garatutako saiakuntza esperimentalak agerian utzi dute eraikin mota hauen airearekiko estankotasun maila altua dela, lortutako batez besteko balioa $n_{50}=9.03 \text{ h}^{-1}$ izanik. Hala ere, erakutsi dute posible dela ere eraikin tipologia honetan kontsumo baxuko eraikinak lortzen dituzten emaitzak lortzea aztertutako lagin estankoen $n_{50}=0.68 \text{ h}^{-1}$ izan delako.

Beste aldetik, burututako harrien eroankortasun termikoen saiakuntzen bitartez detektatu da kareharriko emaitzak espero ziren bezala izan arren, hareharrien emaitzen kasuan araudia eskaintzen duen balioa baino guztiz txikiagoak zirela. Era honetan, garatutako simulazio termiko parametrikoren bitartez posible izan da hormen karakterizazio eredu bat garatzea horma zehatz bakoitzaren ezaugarri termiko eta geometrikoen arabera.

Beraz, emaitzek erakutsi dute aztertutako eraikin motan aurkitu daitezkeen egoerak espero zirenak baino guztiz desberdinak izan daitezkeela. Hori dela eta, agerian utzi da eraikin zehatz bakoitzaren ezaugarri termikoen karakterizazioa ezinbestekoa dela bere eraginkortasun maila era egokian zehazteko.

Ba al dago eraikitako ondarearen baldintzak hobetzeko aukerarik esku-hartze energetiko eraginkorrekin eta beren balio historiko-artistikoa aldatu gabe?

Arestian aipatu bezala, posible bihurtzen da eraikin mota hauen eraginkortasuna hobetzea airearekiko estankotasuna maila handitzen bada aztertutako kasuen arabera aire-ihesak altuak baitira. Horretarako $n_{50}=3 \text{ h}^{-1}$ ezarritako muga arte murriztu daiteke airearekiko estankotasun maila edo hobekuntza pausoa areagotu daiteke energia kontsumo baxuko eraikinen balioetara iritsi arte, baldin eta Barneko Airearen Kalitate (BAK) baldintzak aireztapen mekaniko sistema baten bidez bermatzen badira.

Beste aldetik, hormetatik sortutako bero transmisio galerak ere garrantzitsuak dira. Horren ondorioz bere isolamendu termikoa bero transmisioa murrizteko irtenbide bat bihurtzen da. Hala ere, bere aplikazioa, horma nagusien babes arkitektonikoa dela eta, barrualdetik gauzatu egin behar da Barruko Isolamendu Termikoko Sistemen (BITS) bidez eta horren ondorioz hurrengo galdera sortzen du:

Proposaturiko esku-hartzea segurua da hezetasunaren kondentsazio interstizialarekin lotutako prozesu patologikoen eta egurra usteltzearen arriskuen aurka?

BITSen mota asko direla eta, emaitzak ere oso aldagarriak dira proposatutako sistema batetik bestera; alabaina ondorio argi batzuk lortu dira. Alde batetik BITSen esku-hartze guztietan, ur-uxagarrien erabilera derrigorrezkoa bihurtzen da euriak, hezetasun iturri bezala, sortzen duen hormaren hezetasun edukia murrizteko eta orekan mantendu ahal izateko. Horrela ez izatekotan eta erakutsi den bezala, hezetasunetik sortutako arazoek egurrezko egituraren osotasuna eragingo lukete. Erabilitako isolamendu termiko motei buruzko ondorioei dagokionez aspektu garrantzitsua material bakoitzaren ezaugarri higrotermikoen arabera dela. Ur-lurrin iragazkorak direnak hezetasuna isolamendua erraz zeharkatzen dutenez arazoak sortzen dituzte Lurrin Difusio Barrerak (LDB) edo Lurrin Atzeratzaile Adimentsuak erabiltzen ez badira. Nolabaiteko iragazkortasun erresistentzia eskaintzen duten isolatzaileen kasuan, hala nola poliestireno hedatua (EPS), barneko hezetasun iturrientzat nolabaiteko barrera baten funtzioa dute, beraz kasu hauetan ez lirateke izango beharrezkoak LDBak edo LAAk erabiltzea isolamendu berak lortzen baitu hormaren hezetasuna kontrol mailan mantentzea. Azkenik Isolamendu Kapilar Aktiboen (IKA) kasuko kasuak ere lortzen dute hezetasun maila kontrolpean edukitzea mintzen erabilerarik gabe. Ur likidoa xurgatzeko duten propietatea ahalbidetzen du kondentsatutako hezetasuna barnealdera garraiatzea hormaren alde hotzean arriskurik ez sortzeko.

Beraz, lortutako emaitzen arabera, posible da birgaitze energetikoetarako BITSak proposatzea bero galerak murrizteko eta aldi berean hezetasunarekin loturiko patologia saihesten direla ziurtatzea.

Zein da lortu daitekeen energia hobekuntza globala esku-hartze pasiboen bidez ikerketako eraikuntza tipologiarentzat?

Esku-hartze mota bakoitza eragin ezberdina du ikertzen den kasuaren orientazioaren arabera. Isolamendu termikoaren gehitzea jatorrizko berokuntza-eskaria %37tik-%53rainoko murrizketa lortu dezake. Hala ere, badago isolamendu termikoaren lodiera bat muga bezala egiten duela. Kasu honetan 12cm-koa izan da eta lodiera hau baino gehiago erabiltzen bada lortutako berokuntza-eskariaren murrizketa ez da oso nabarmenikoa. Leihoen aldaketekin, efektu antzekoa gertatzen da eta gainera azterketa kasuaren orientazioa hegoaldekoa bada ezaugarri termiko handiko leihoak erabiltzeak ez du lortzen hobekuntza garrantzitsurik. Lortutako bero transmisio galeren murrizketa eguzkitik galtzen den energiarekin orekatzen da. Beraz, orientazio bakoitzak leiho mota zehatza erabili beharko luke. Azkenik, aireareiko-estankotasun mailaren efektua oso garrantzitsua izatea erakutsi du eraikinen eraginkortasun energetikoan. Bere jatorrizko estankotasuna, $n_{50}=9.03 \text{ h}^{-1}$ batez bestekoa kontuan hartuta, murriztea lortzen bada, berokuntza-eskariaren %36tik-%46raino murriztu



daiteke. Hala ere, balore hauek lortu ahal izateko eta Barruko Airearen Kalitatea bermatzeko, aireztapen sistema mekanikoak erabili behar dira. Sistema hauek ez instalatzekotan, $n_{50}=3 \text{ h}^{-1}$ estankotasun maila muga bezala kontuan hartu beharko litzateke eta horrela jatorrizko berokuntza-eskaria %24tik-%31eraino murriztea lortu ahal izango litzateke.

Zein da esku-hartze konbinazio onena kostuaren eta energi aurrezkiaren arteko erlazioari dagokionez?

Hainbat esku-hartze konbinazio mota daudenez, kasu bakoitzean lortutako murrizketak oso ezberdinak izan daitezke. Hala ere, optimizazio ereduak tresna ezin hobekak bihurtzen dira kasu optimoak detektatu ahal izateko. Garatutako ereduak, esku-hartzearen kostua eta berokuntza-eskaria helburu bezala ezarriz, esku-hartze optimoa orientazio bakoitzaren arabera erabakitzeke balio izan du.

Lortutako emaitzetatik ondorioztatu daiteke, oro har esku hartze optimoa parametro guztien aldaketa (isolamendu termikoa, leiho aldaketa eta estankotasun maila murriztea) kontuan hartzen duena dela. Hala ere, horretarako parametro bakoitzaren esku-hartze maila ez da oso sakona. Arestian aipatu den bezala, isolamendu termikoaren kasuan isolamenduaren lodiera txikiak proportzionalki berokuntza-eskariaren murrizketa handienak lortzen dituztenak dira. Horrela, isolamendu termikoaren bitartez murrizketa handiagoa lortzeko proportzionalki kostua areagotzen da eta horren ondorioz beste esku-hartze mota burutzea gomendagarriagoa da, hala nola airearekiko-estankotasun maila hobetzea edo leihoen aldaketa.

Ondorio orokor bezala, ikerketak erakutsi du nola eraikitako ondarearen tipologia ezin duela energia eraginkortasunen esku-hartze neurrietatik baztertuta geratu. Aplikazio-eremu zabala dago esku-hartze energetiko hauentzako, gainera eraikinen energia-kontsumoa murriztea ahalbidetzeaz gain, barruko erosotasuneko baldintzak hobetzea lortuko litzateke. Hau da, eraikinaren balio orokorra handitzeaz gain, bere ondare balioa mantenduko litzateke, eta horrela gizarteak balio hori gozatzeko aukerarekin jarraituko luke.

6.2. Etorkizuneko ikerlanak

Garatutako analisiarekin Dokotorego Tesiaren helburuak bete izan arren, loturiko eta garatu gabeko ikerketa-ildo berriak detektatu dira eta etorkizuneko ikerlan bezala proposatzen dira:

- Barruko Isolamendu Termikoko Sistemiei (BITS) dagokionez:

- BITS esku-hartzeen benetako portaera egiaztatze saiakuntza, hormako geruzen profil higrotermikoaren monitorizazioaren bitartez.
- Garatutako egur-usteltze ereduak babesik gabeko egurrean oinarritu da. Beste ikerketa ildo batzuk termikoki aldatutako egurren (TMT) ebaluazioa izan liteke eta bere aplikazioa eraikinen birgaitze energetikoetan. ThermoWood® edo Plato® prozesuak oinarri gisa erabil litezke.
- BITS erabileraren ondorioz jatorrizko horma eskaintzen zuen moteltze-termikoa kaltetuta ikusten da eta barnealdean tenperatura gailurrak ekoizteko gai izanik. Proposatutako esku-hartzeen barruko akabera PCMetan oinarritutako materialetan erabiltzen badira inertzia termikoa handitzea lortuko litzateke eta horrela sortutako arazoaren irtenbidea bezala aurkezten dira. Beraz, BITSen eta PCMen azterketa konbinatuak eraikitako ondarearen arloan burutzeko ikerketa-ildo bezala bihurtzen da.
- Iturburu Irekiko Plataformei (IIP) eta Gauzen Internetari (GI) dagokionez:
 - Garatutako monitorizazio ekipamendua zenbait parametroen monitorizazioan zentratu egin da (tenperatura, hezetasuna, presioa, CO₂). Hala ere, eraikinen monitorizazioan garrantzi handia duten beste hainbat parametroen jarraipena ere posible izango litzateke teknologia bera oinarrituta eta beste sentsoak erabiliz, hala nola elektrizitate kontsumoa, ur kontsumoa, argitasun maila, pultsu irakurlea etab.
 - V. kapituluaren garatutako monitorizazio ekipamendua WiFi haririk gabeko teknologian oinarritu da. Izan liteke etorkizuneko monitorizazio kasuetan WiFi seinalearen sarbidea ez izatea eraikina zerbitzu hau ez duelako edo agian monitorizazioa kanpoaldean egin behar delako. Kasu hauetan, eta sistemen haririk gabeko datuen transmisioa helburua mantentzen jarraituz, SigFox oinarritutako teknologia erabil liteke. Hau "Low-Power Wide-Area Network" (LPWAN) teknologia da, beraz Egokia izango litzateke energia-kontsumo baxuko proiektuen garapenean eta distantzi handietan datuak bidaltzeko gai izateko.
- Eraikinen birgaitze energetikoen simulazioetan oinarritutako proposamenei buruz:
 - Optimizazio simulazioetan beroa berreskuratzeko aireztapen sistemak kontuan hartu, airearekiko estankotasun maila handia duten birgaitze-kasuen eraginkortasun eta kostu lotura aztertzeko.



- Ikerketa honek kostu-inbertsio dagokion kasuen optimizazioan zentratu egin da; aldiz, garrantzi handiko diren beste helburu kontuan hartu daitezke. Horren ondorioz, adibide bezala, erosotasun termiko ikuspegi batetik EN-15251:2017 bezalako arauak proposatzen duten irizpideetan oinarritu daiteke diseinua edo jasangarritasun ikuspegi batetik Bizitza Ziklo Analisia bezalako aspektuak aztertu ahal izango liriateke. Era honetan, eraikinen birgaitze energetikoen optimizazio irizpideak lotu ahal izango litezke diseinu konplexuagoak burutzeko gaitasuna izanez.
- Garatutako diseinua etxebizitzako kasuan oinarritu da. Izan liteke, beste erabilera motako eraikinen birgaitzen direnean, barruko kargak ezberdinak direla eta, proposatu behar diren diseinuak zertxobait aldatzeko beharra izatea.

6.3. Ekarpinak

Doktorego Tesian zehar, jarduera paralelo desberdinak egin dira. Horien artean, garatutako ikerketaren hedatzea bai nazio bai nazioarte mailan argitaratu da eta ondoren aurkezten da.

6.3.1. Nazioarteko aldizkariak

BAÏRI, A.; NITHYADEVI, N.; BAÏRI, I.; MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J. A., "Thermal design of a sensor for building control equipped with QFN electronic devices subjected to free convection. Effects of the encapsulating resin". *Energy and Buildings* 141, (2017) 218-225. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.022>

BAÏRI, A.; ROSEIRO, L.; MARTÍN-GARÍN, A.; ADEVEYE, K.; MILLÁN-GARCÍA, J. A., "Thermal state of electronic assemblies applied to smart building equipped with QFN64 device subjected to natural convection". *Microelectronics Reliability* 70, (2017) 79-83. ISSN: 0026-2714. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.01.002>

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J. A.; BAÏRI, A.; MILLÁN-MEDEL, J.; SALA-LIZARRAGA, J. M., "Environmental monitoring system based on an Open Source Platform and the Internet of Things for a building energy retrofit". *Automation in Construction*. 87 (2018) 201-214. ISSN: 0926-5805. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.017>

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J. A.; SALA-LIZARRAGA, J. M.; HIDALGO-BETANZOS, J. M.; BAÏRI, A., "Internet of Things y Open Source Platforms como herramientas de apoyo para la construcción 4.0." *ANALES de Edificación* 4 (2), (2018). ISSN: 2444-1309. DOI: <https://doi.org/10.20868/ade.2018.3772>

6.3.2. Aldizkari nazionalak

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J. A.; HIDALGO-BETANZOS, J. M.; EPELDE-MERINO, M., "Edificios históricos con metas de los edificios del presente". *Revista PH. 88. Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*. ISSN: 2340-7565. 2015eko azaroa.

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J. A., "Herramientas para el seguimiento del comportamiento real de los edificios". *Revista CIC Arquitectura y Sostenibilidad*. 545, 20-23. ISSN: 1576-118. 2018ko apirila.

6.3.3. Nazioarteko kongresuak

MARTÍN-GARÍN, A.; HIDALGO-BETANZOS, J.M.; MILLÁN-GARCÍA, J.A.; IRIBAR-SOLABARRIETA, E., "Building energy retrofit of dwellings under the special plan of urban built heritage protection in Donostia-San Sebastián" International Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings: Experiences & Solutions. Historic Houses Foundation (FCHS) and Ars Civils Foundation. 2014eko irailaren 29a eta 30a. Madrid (España).

HIDALGO-BETANZOS, J.M.; MILLÁN-GARCÍA, J.A.; MARTÍN-GARÍN, A.; IRIBAR-SOLABARRIETA, E.; FLORES-ABASCAL, I.; ZUBILLAGA, I., "Architectural surveys in rural areas" International Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings: Experiences & Solutions. Historic Houses Foundation (FCHS) and Ars Civils Foundation. 2014eko irailaren 29a eta 30a. Madrid (España).

MILLÁN-GARCÍA, J.A.; HIDALGO-BETANZOS, J.M.; MARTÍN-GARÍN, A.; ESCUDERO-REVILLA, C.; SALA-LIZARRAGA, J. M., "Validación del proceso de cálculo por el método de elementos finitos de la transmitancia térmica de marcos de ventana según normativa y predicción del riesgo de condensaciones". XII Congreso Ibero-Americano de Climatización y Refrigeración CIAR. 2015eko apirilaren 29a eta 30a. Madrid (España).

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J.A.; HIDALGO-BETANZOS, J.M.; ESCUDERO-REVILLA, C.; SALA-LIZARRAGA, J. M., "Metodología para la caracterización de la demanda energética de los edificios patrimoniales". XII Congreso Ibero-Americano de Climatización y Refrigeración CIAR. 2015eko apirilaren 29a eta 30a. Madrid (España).

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J.A.; HIDALGO-BETANZOS, J.M.; PICALLO-PÉREZ, A.; GASTAÑARES-LIZARRITURRI, J., "Discovering the energy performance of our built heritage through its air leakages detection". 7th European Conference on Energy Efficiency and sustainability in Architecture and Planning. EESAP 2016. 2016ko ekainaren 4tik 6ra. Donostia-San Sebastián (España).

PICALLO-PÉREZ, A.; PEREZ, E.; MARTÍN-GARÍN, A.; HERNÁNDEZ, A.; SALA-LIZARRAGA, J. M., "Thermoeconomics, a tool for improving sustainability in buildings". 7th European Conference on Energy Efficiency and sustainability in Architecture and Planning. EESAP 2016. 2016ko ekainaren 4tik 6ra. Donostia-San Sebastián (España).

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J.A.; HIDALGO-BETANZOS, J.M.; PICALLO-PÉREZ, A.; SALA-LIZARRAGA, J. M., "The inherent barriers in air tightness analysis of heritage buildings". Congreso Euro-Americano REHABEND 2016 sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio. 2016ko maiatzaren 24tik 27ra. Burgos (España).

MILLÁN-GARCÍA, J.A.; MARTÍN-GARÍN, A.; HIDALGO-BETANZOS, J.M., "Laboratorio de Ingeniería Térmica para Entornos Virtuales de Aprendizaje". Congreso Internacional de Nuevas Tecnologías y Tendencias en la Educación (CINTE 16). 2016ko urriaren 4tik 6ra. Bilbao (España).

6.3.4. Kongresu nazionalak

BASAÑEZ-ALFONSO, I.; DE LORENZO-URIEN, A.; MARTÍN-GARÍN, A.; HIDALGO-BETANZOS, J.M.; EPELDE-MERINO, M.; MILLÁN-GARCÍA, J.A., "El impacto de los puentes térmicos de los huecos de fachada en la rehabilitación con SATE". III Congreso sobre Estrategias para la Rehabilitación Energética de Edificios (ERE2+). 2015eko urriaren 28tik 29ra. Madrid.

EPELDE-MERINO, M.; HIDALGO-BETANZOS, J.M.; MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J.A., "Deficiencias en eficiencia: análisis de errores detectados en la ejecución de rehabilitaciones energéticas". III Congreso sobre Estrategias para la Rehabilitación Energética de Edificios (ERE2+). 2015eko urriaren 28tik 29ra. Madrid.

MARTÍN-GARÍN, A.; HIDALGO-BETANZOS, J.M.; MILLÁN-GARCÍA, J.A., Ponencia: "Una visión holística en materia de Eficiencia Energética en Edificación". V Congreso nacional de estudiantes de arquitectura técnica e ingeniería de edificación. 2015eko apirilaren 16tik 17ra. Donostia-San Sebastián.

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J.A.; HIDALGO-BETANZOS, J.M.; SALA-LIZARRAGA, J. M.; BAÑI, A., "Internet of Things y Open Source Platforms como herramientas de apoyo para la



Construcción 4.0". La Convención de la Edificación-CONTART 2018. 2018ko maiatzaren 30tik ekainaren 1era. Zaragoza.

6.3.5. Jardunaldi teknikoak

XIV Semana de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Zientziaren, Teknologiaren eta Berrikuntzaren XIV. Astea. Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibetsitatea UPV/EHU. de 2014eko urriaren 31tik azaroaren 7ra. Donostia-San Sebastián.

Semana Europea de la Energía Sostenible EUSEW 2015. Ponencia: "Rehabilitación energética del ensanche decimonónico de Donostia". Kursaal Rehabilitaciones Integrales-Fomento San Sebastián. 2015eko ekainaren 18a. Donostia-San Sebastián.

Zientziaren, Teknologiaren eta Berrikuntzaren XV. Astea. XV Semana de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibetsitatea UPV/EHU. 2015eko azaroaren 5tik 11ra. Donostia-San Sebastián.

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J.A., Comunicación Oral: "Descubriendo la vertiente energética de nuestro Patrimonio Edificado". I Jornadas Doctorales de la UPV/EHU. UPV/EHUko I.Doktorego Jardunaldiak. 2016ko irailaren 11tik 12ra. Bilbo.

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J.A., Póster: "Descubriendo la vertiente energética de nuestro Patrimonio Edificado". I Jornadas Doctorales de la UPV/EHU. UPV/EHUko I.Doktorego Jardunaldiak. 2016ko irailaren 11tik 12ra. Bilbo.

Zientziaren, Teknologiaren eta Berrikuntzaren XVI. Astea. XVI Semana de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibetsitatea UPV/EHU. 2016ko azaroaren 5tik 11ra. Donostia-San Sebastián.

Semana Europea de la Energía Sostenible EUSEW 2017. Ponencia: "Control de la Rehabilitación de Alta Eficiencia: la Monitorización como herramienta base". Kursaal Rehabilitaciones Integrales-Fomento San Sebastián. 2017ko ekainaren 22an. Donostia-San Sebastián.

Zientziaren, Teknologiaren eta Berrikuntzaren XVII. Astea. XVII Semana de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación. Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibetsitatea UPV/EHU. 2017ko azaroaren 8tik 12ra. Donostia-San Sebastián.

MARTÍN-GARÍN, A.; MILLÁN-GARCÍA, J.A., Ponencia: "Rehabilitación energética de edificios en los centros históricos". IV Jornada Rehabilitación de Edificios. IV. Jardunaldia. Eraikinen Birgaitzea. 2017eko abenduaren 12an. Donostia-San Sebastián.

Bibliografía

Bibliografía



I. Kapitulu

- [1] R.T. Watson, D.L. Albritton, Climate change 2001: Synthesis report: Third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press (2001).
- [2] N. Stern, The economics of climate change, American Economic Review. 98 (2008) 1-37.
- [3] United Nations, Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. (1998) <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
- [4] EC-European Commission, Green Paper—A European strategy for sustainable, competitive and secure energy, European Commission DG Energy and Transport, COM (2006). 105 (2006).
- [5] EEA, Indicator Assessment | Data and maps. Overview of the European energy system. European Environment Agency. (2015).
- [6] EUROSTAT, Greenhouse gas emission statistics - emission inventories. Statistics Explained. (2018).
- [7] EEA, Indicator Assessment | Data and maps. Share of renewable energy in gross final energy consumption, European Environment Agency. (2017).
- [8] S. Rueda, P5 Modelos de ordenación del territorio más sostenibles, Boletín CF S. Biblioteca CF S (2006).
- [9] G.H. Brundtland, Report of the World Commission on environment and development: "our common future.", United Nations (1987).
- [10] European Parliament, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union. Official Journal of the European Union. (2010) L 153/13. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF> (accessed November 14, 2017).
- [11] M. Economidou, B. Atanasiu, C. Despret, J. Maio, I. Nolte, O. Rapf, Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings, Buildings Performance Institute Europe (BPIE) (2011)., ISBN: 9789491143014.
- [12] EEA, Indicator Assessment | Data and maps. Final energy consumption by sector and fuel. European Environment Agency. (2017).
- [13] EEA, Indicator Assessment | Data and maps. Progress on energy efficiency in Europe. European Environment Agency. (2016).
- [14] European Commission, EU Building Stock Observatory: Database, (2018) <https://ec.europa.eu/energy/en/eu-buildings-database>.
- [15] Agence internationale de l'énergie, Energy technology perspectives 2012: pathways to a clean energy system, OECD/IEA (2012)., ISBN: 978-92-64-17488-7.
- [16] M. Aksoezen, M. Daniel, U. Hassler, N. Kohler, Building age as an indicator for energy consumption, Energy and Buildings. 87 (2015) 74-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.074>.
- [17] Ministerio de Fomento, Encuesta de la Estructura de la Industria de la Construcción (EEIC), Ministerio de Fomento. Dirección General de Programación Económica y Presupuestos Subdirección General de Estadísticas (2016)



http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/atencion_ciudadano/INFORMACION_ESTADISTICA/Construccion/EstructuraConstruccion/EIC_Publicacion/default.htm.

- [18] ENTRANZE, Policies to ENforce the TRAnstition to Nearly Zero Energy buildings in the EU-27. Policies to enforce the transition to nZEB: Synthesis report and policy recommendations from the project ENTRANZE. (2014).
- [19] European Parliament, Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union. (2002) L 1/65. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0091> (accessed November 14, 2017).
- [20] European Parliament, Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the European Union. (2018) L 156/75. https://eur-lex.europa.eu/procedure/EN/2016_381 (accessed June 19, 2018).
- [21] L. de Santoli, F.R. d'Ambrosio Alfano, Energy efficiency and HVAC systems in existing and historical buildings, *The Rehva European HVAC Journal*. 51 (2014) 44-48.
- [22] L. Mazzarella, Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view, *Energy and Buildings*. 95 (2015) 23-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.073>.
- [23] A. Martínez-Molina, I. Tort-Ausina, S. Cho, J.-. Vivancos, Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 61 (2016) 70-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.018>.
- [24] Changeworks, Resources for Life Ltd., *Energy Heritage. A guide to improving energy efficiency in traditional and historic homes*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO. (2008).
- [25] D. Pickles, I. McCaig, *Energy efficiency and historic buildings Application of part L of the Building Regulations to historic and traditionally constructed buildings*, English Heritage (2011).
- [26] A. Troi, Z. Bastian, *Energy efficiency solutions for historic buildings: A handbook*, Birkhäuser (2014)., ISBN: 9783038216469.
- [27] L. de Santoli, Guidelines on energy efficiency of cultural heritage, *Energy and Buildings*. 86 (2015) 534-540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.050>.
- [28] Z. Bastian, W. Feist, C. Baumgärtner, W. Ebel, E. Gollwitzer, J. Grove-Smith, et al., *Altbaummodernisierung mit Passivhauskomponenten*, Passivhaus Institut, Darmstadt, (2009).
- [29] G. Franco, A. Magrini, *Historical buildings and energy*, *Historical Buildings and Energy*, (2017), pp. 1-221.
- [30] M. López, A. Yáñez, S. Gomes da Costa, L. Avellá, *Proceedings of the International Conference on Energy Efficiency and Historic Buildings (Madrid, 29-30 Sep. 2014)*. , in: *Fundación de Casas Históricas y Singulares y Fundación Ars Civilis (Ed.)*, Madrid (Spain) ed., (2014), ISBN: 978-84-617-3440-5.
- [31] M. Bouw, S. Dubois, L. Dekeyser, Y. Vanhellefont, *EECHB-2016: Second International Conference on Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings*, Brussels (Belgium) ed., Flanders Heritage Agency, (2016),.
- [32] ASHRAE, *ASHRAE Guideline 34P. Energy Guideline for Historical Buildings*, SI ed., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, (March 2016)., ISBN: 9781933742557.

- [33] CEN, EN 16883:2017, Conservation of cultural heritage — Guidelines for improving the energy performance of historic buildings. European Committee for Standardization (CEN), Brussels (2017). 16883 (2017).
- [34] P. Warm, R. Oxley, Guide to building services for historic buildings—Sustainable services for traditional buildings, CIBSE, London. (2002).
- [35] Francesca Romana d’Ambrosio (Ed.), Livio Mazzarella (Ed.), Laura Bellia, Marco Filippi, Livio de Santoli, Piercarlo Romagnoni, ENERGY EFFICIENCY IN HISTORIC BUILDINGS, REHVA Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations (2018).
- [36] H. England, Energy Efficiency and Historic Buildings—Application of Part L of the Building Regulations to Historic and Traditionally Constructed Buildings. (2011).
- [37] R. Cantin, J. Burgholzer, G. Guarracino, B. Moujalled, S. Tamelikecht, B.G. Royet, Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France, Building and Environment. 45 (2010) 473-484. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.07.010>.
- [38] D. Pickles, Energy Efficiency and Historic Buildings. Draught-proofing windows and doors., English Heritage (2012).
- [39] H. Garrecht, S. Reeb, J.L. Hernández, G. Paci, Á Corredera, E. Esposito, et al., 3ENCULT—Efficient Energy for EU Cultural Heritage project.Report D 4.5 Guideline for the implementation of monitoring system, (2014),.
- [40] F.J. Mesas-Carrascosa, D. Verdú Santano, J.E.M. de Larriva, R. Ortiz Cordero, R.E. Hidalgo Fernández, A. García-Ferrer, Monitoring heritage buildings with open source hardware sensors: A case study of the mosque-cathedral of Córdoba, Sensors. 16 (2016) <http://dx.doi.org/10.3390/s16101620>.
- [41] E. Arumägi, M. Mändel, T. Kalamees, Method for Assessment of Energy Retrofit Measures in Milieu Valuable Buildings, Energy Procedia. 78 (2015) 1027-1032. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.052>.
- [42] N. May, N. Griffiths, Planning responsible retrofit of traditional buildings, Sustainable Traditional Building Alliance. (2015).

II. Kapituluia

- [1] Ministerio de Fomento, Código Técnico de la Edificación. Documento básico HE .Ahorro de energía, CTE, DB-HE. (2013).
- [2] European Parliament, Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Official Journal of the European Union. (2018) L 156/75. https://eur-lex.europa.eu/procedure/EN/2016_381 (accessed June 19, 2018).
- [3] J. Fernández-Agüera, J.J. Sendra, S. Domínguez, Protocols for measuring the airtightness of multi-dwelling units in Southern Europe, Procedia Engineering. 21 (2011) 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.1992>.
- [4] J. Kronvall, Testing of houses for air leakage using a pressure method. ASHRAE TRANS. 84 (1978) 72-79.
- [5] K. Gadsby, G. Linteris, G. Dutt, D. Harrje, The blower door. 124 (1981).
- [6] J.A. INGEBA-SAEZ GARCÍA, Geografía e historia de Donostia-San Sebastián. 5.2. Evolución de la trama urbana. (2013).



- [7] A. Dadoo, L. Gustavsson, R. Sathre, Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings, *Energy and Buildings*. 43 (2011) 1566-1572. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.019>.
- [8] European Parliament, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Official Journal of the European Union*. Official Journal of the European Union. (2010) L 153/13. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF> (accessed November 14, 2017).
- [9] European Parliament, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32, *Official Journal of the European Union*. 315 (2012) 1-56. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:en:PDF> (accessed November 14, 2017).
- [10] A. Troi, Z. Bastian, *Energy efficiency solutions for historic buildings: A handbook*, Birkhäuser (2014), ISBN: 9783038216469.
- [11] L. Eskola, Ü Alev, E. Arumägi, J. Jokisalo, A. Donarelli, K. Sirén, et al., Airtightness, air exchange and energy performance in historic residential buildings with different structures, *International Journal of Ventilation*. 14 (2015) 11-26. <https://doi.org/10.1080/14733315.2015.11684066>.
- [12] S. Alves, J. Fernández-Agüera, J.J. Sendra, Infiltration rate performance of buildings in the historic centre of Oporto, *Informes de la Construcción*. 66 (2014) <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.009>.
- [13] D. Dickerhoff, D.T. Grimsrud, R.D. Lipschutz, *Component leakage testing in residential buildings*, Lawrence Berkeley National Laboratory. (1982).
- [14] D. Harrje, G. Born, *Cataloguing air leakage components in houses*, (1982),.
- [15] ASHRAE, *Ventilation and infiltration*, Ch. 16 of 2013 ASHRAE Handbook - Fundamentals, SI ed., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, (2013), ISBN: 9781933742557.
- [16] A.K. Persily, G.T. Linteris, *A comparison of measured and predicted infiltration rates*. ASHRAE Transactions, (1983), pp. 183-200.
- [17] D. Grimsrud, *Infiltration-pressurization correlations: Detailed measurements on a California house*. Lawrence Berkely lab. Dept of enery. Report LBL-7824, ASHRAE-symposium. on air infiltration in Philadelphia, PA, USA in Jan, (1979),.
- [18] M.H. Sherman, D.T. Grimsrud, *Infiltration-pressurization correlation: simplified physical modeling*, California Univ., Berkeley (USA). Lawrence Berkeley Lab. (1980).
- [19] M.H. Sherman, *Estimation of infiltration from leakage and climate indicators*, *Energy and Buildings*. 10 (1987) 81-86.
- [20] CEN, *Ventilation for buildings. Calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration*. Brussels. European Committee for Standardization. (2007).
- [21] A. Meiss, J. Feijó-Muñoz, *The energy impact of infiltration: a study on buildings located in north central Spain*, *Energy Efficiency*. 8 (2014) 51-64. <https://doi.org/10.1007/s12053-014-9270-x>.
- [22] A. Jimenez Tiberio, P. Branchi, *A study of air leakage in residential buildings*. *New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE)*, 2013 International Conference on, IEEE, (2013), pp. 1-4.

- [23] G. Villi, C. Peretti, S. Graci, M. de Carli, Building leakage analysis and infiltration modelling for an Italian multi-family building, *Journal of Building Performance Simulation*. 6 (2013) 98-118. <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.699981>.
- [24] F.R. d'Ambrosio Alfano, M. Dell'Isola, G. Ficco, F. Tassini, Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method, *Building and Environment*. 53 (2012) 16-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.017>.
- [25] A. Sfakianaki, K. Pavlou, M. Santamouris, I. Livada, M.-. Assimakopoulos, P. Mantas, et al., Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece, *Building and Environment*. 43 (2008) 398-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.006>.
- [26] D. Sinnott, M. Dyer, Air-tightness field data for dwellings in Ireland, *Building and Environment*. 51 (2012) 269-275. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.016>.
- [27] T. Kalamees, Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia, *Building and Environment*. 42 (2007) 2369-2377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.001>.
- [28] N.M.M. Ramos, R.M.S.F. Almeida, A. Curado, P.F. Pereira, S. Manuel, J. Maia, Airtightness and ventilation in a mild climate country rehabilitated social housing buildings – What users want and what they get, *Building and Environment*. 92 (2015) 97-110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.016>.
- [29] J. Šadauskienė, V. Pauks̄tys, L. Šeduikyte, K. Banionis, Impact of air tightness on the evaluation of building energy performance in lithuania, *Energies*. 7 (2014) 4972-4987. <https://doi.org/10.3390/en7084972>.
- [30] W. Walther, B. Rosenthal, Airtightness testing of large and multi-family buildings in an energy performance regulation context, *ASIEPI* (2009).
- [31] S. DePani, *A study on single blower door methods for multifamily buildings in Montreal* (Doctoral dissertation, Concordia University). A study on single blower door methods for multifamily buildings in Montreal. Concordia University (1999).
- [32] ISO, ISO 9972: Thermal performance of buildings - Determination of air permeability of buildings - Fan pressurization method. Performance thermique des bâtiments - Détermination de la perméabilité à l'air des bâtiments - Méthode de pressurisation par ventilateur. 3rd ed., ISO, Switzerland, (2015).26.
- [33] F.R. d'Ambrosio Alfano, M. Dell'Isola, G. Ficco, B.I. Palella, G. Riccio, Experimental air-tightness analysis in mediterranean buildings after windows retrofit, *Sustainability (Switzerland)*. 8 (2016) <https://doi.org/10.3390/su8100991>.
- [34] E. ISO, 6946: 2007, Building components and building elements–Thermal resistance and thermal transmittance–Calculation method. (2007).
- [35] AENOR, UNE-EN ISO 10456: Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados. (ISO 10456:2007),Madrid, España (2012).
- [36] AENOR, UNE-EN 12667: Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica.Madrid, España (2002).
- [37] AENOR, UNE-EN ISO 8990: Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada. (ISO 8990:1994),Madrid, España (1997).



- [38] AENOR, UNE-EN ISO 10211: Puentes térmicos en edificación. Flujos de calor y temperaturas superficiales. Cálculos detallados. (ISO 10211:2007), Madrid, España (2012).
- [39] COMSOL Multiphysics, Thermal Bridges in Building Construction - 3D Structure Between Two Floors,.
- [40] D.H. A. Martín-Garín, Sistemas innovadores en carpinterías y su aplicación en viviendas. Trabajo inédito del Máster de Investigación en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Industria, Transporte, Edificación y Urbanismo de la Universidad del País Vasco UPV/EHU. , (2014).
- [41] IDAE, Guía Técnica para la Rehabilitación de la Envolvente Térmica de los Edificios. Soluciones de Acristalamiento y Cerramiento Acristalado. Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. (2008).
- [42] AENOR, UNE-EN ISO 10077-1: Comportamiento térmico de ventanas, puertas y persianas. Cálculo de la transmitancia térmica. Parte 1: Generalidades. (ISO 10077-1:2006), Madrid, España (2010).

III. Kapituluia

- [1] A. Hukka, H.A. Viitanen, A mathematical model of mould growth on wooden material, Wood Science and Technology. 33 (1999) 475-485. <http://dx.doi.org/10.1007/s002260050131>.
- [2] K. Sedlbauer, Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components, Fraunhofer Institute for Building Physics (2001). https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/en/documents/ks_dissertation_etcm1021-30729.pdf (accessed January 14, 2018).
- [3] H. Viitanen, T. Toratti, L. Makkonen, R. Peuhkuri, T. Ojanen, L. Ruokolainen, et al., Towards modelling of decay risk of wooden materials, European Journal of Wood and Wood Products. 68 (2010) 303-313. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-010-0450-x>.
- [4] H. Viitanen, Modelling the time factor in the development of brown rot decay in pine and spruce sapwood - The effect of critical humidity and temperature conditions, Holzforschung. 51 (1997) 99-106. <http://dx.doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.2.99>.
- [5] H. Hens, Heat, air and moisture transfer in highly insulated envelope parts, task 1: Modelling. Final Report , vol. 1: Modelling, International Energy Agency, Annex 24. Catholic University-Leuven, Laboratorium for Building Physics, Belgium. (1996).
- [6] H.M. Künzel, K. Kiessl, Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components, International Journal of Heat and Mass Transfer. 40 (1996) 159-167. [http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310\(96\)00084-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310(96)00084-1).
- [7] H. Glaser, Wärmeleitung und Feuchtigkeitsdurchgang durch Kühlraumisolierungen, Kältetechnik H. 3 (1958) 86-91.
- [8] H. Glaser, Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen, Kältetechnik. 11 (1959) 345-349.
- [9] ISO, Hygrothermal performance of building components and building elements- Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation-Calculation methods (ISO 13788: 2012), (2013).
- [10] H.M. Künzel, Simultaneous heat and moisture transport in building components. One-and two-dimensional calculation using simple parameters,.

- Fraunhofer Institute of Building Physics (1995)., ISBN: 3-8167-4103-7
<https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2014/12/Künzel-1995-Simultaneous-Heat-and-Moisture-Transport1.pdf> (accessed January 14, 2018).
- [11] P. Häupl, J. Grunewald, H. Fechner, H. Stopp, Coupled heat air and moisture transfer in building structures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 40 (1997) 1633-1642. [http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310\(96\)00245-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0017-9310(96)00245-1).
- [12] A. Nicolai, Modeling and numerical simulation of salt transport and phase transitions in unsaturated porous building materials, Syracuse University (2008).
- [13] G.H. Dos Santos, N. Mendes, Combined heat, air and moisture (HAM) transfer model for porous building materials, *Journal of Building Physics*. 32 (2009) 203-220. <http://dx.doi.org/10.1177/1744259108098340>.
- [14] J.M.P.Q. Delgado, E. Barreira, N.M.M. Ramos, V.P. De Freitas, *Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics*, Springer (2013)., ISBN: 978-3-642-35002-3.
- [15] CEN, EN 15026: 2007: Hygrothermal performance of building components and building elements-Assessment of moisture transfer by numerical simulation, 15026 (2007).
- [16] ASHRAE, Standard 160-2009, Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. (2009).
- [17] WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. Merkblatt 6-2, Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse (Simulation of heat and moisture transfer), (2014)., ISBN: 978-3-8167-9393-9.
- [18] ASHRAE, Heat, air, and moisture control in building assemblies-Fundamentals, Ch. 25 of 2013 ASHRAE handbook of fundamentals, SI ed., American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, (2013)., ISBN: 9781933742557.
- [19] H.M. Künzel, Effect of interior and exterior insulation on the hygrothermal behaviour of exposed walls, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 31 (1998) 99-103. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02486471>.
- [20] G.R. Finken, S.P. Bjarløv, R.H. Peuhkuri, Effect of façade impregnation on feasibility of capillary active thermal internal insulation for a historic dormitory - A hygrothermal simulation study, *Construction and Building Materials*. 113 (2016) 202-214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.019>.
- [21] M. Guizzardi, J. Carmeliet, D. Derome, Risk analysis of biodeterioration of wooden beams embedded in internally insulated masonry walls, *Construction and Building Materials*. 99 (2015) 159-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.022>.
- [22] H.M. Künzel, K. Kiessl, Drying of brick walls after impregnation, *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen*. 2 (1996) 87-100. <http://dx.doi.org/10.1515/rbm-1996-5090>.
- [23] M. Morelli, T.R. Nielsen, G.A. Scheffler, S. Svendsen, Internal insulation of masonry walls with wooden floor beams in Northern humid climate, *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings - 11th International Conference*, (2010).
- [24] M. Harrestrup, S. Svendsen, Full-scale test of an old heritage multi-storey building undergoing energy retrofitting with focus on internal insulation and moisture, *Building and Environment*. 85 (2015) 123-133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.005>.



- [25] M. Harrestrup, S. Svendsen, Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades, *Building and Environment*. 99 (2016) 59-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.019>.
- [26] K. Ueno, Masonry wall interior insulation retrofit embedded beam simulations, *Proceedings of building enclosure science & technology conference, BEST 3: high performance buildings—combining field experience with innovation*, Atlanta, GA, USA, (2012),.
- [27] U. Ruisinger, Long-term measurements and simulations of five internal insulation systems and their impact on wooden beam heads, *2nd Central European Symposium on Building Physics*, Vienna ed., (2013), pp. 0.27.
- [28] P. Johansson, S. Geving, C. Hagentoft, B.P. Jelle, E. Rognvik, A.S. Kalagasidis, et al., Interior insulation retrofit of a historical brick wall using vacuum insulation panels: Hygrothermal numerical simulations and laboratory investigations, *Building and Environment*. 79 (2014) 31-45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.014>.
- [29] WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. Merkblatt 6-8, Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen - Vereinfachte Nachweise und Simulation (Assessment of humidity in timber constructions – simplified verifications and simulation), (2016),. ISBN: 978-3-8167-9882-8.
- [30] J. Straube, K. Ueno, C. Schumacher, Measure guideline: internal insulation of masonry walls, *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Golden, CO. (2012).
- [31] B. Fröhlich, I. Schaefer, *Leitfaden Innendämmung 2.0*, (2015).
- [32] J. Little, C. Ferraro, B. Arregi, Assessing risks in insulation retrofits using hygrothermal software tools. *Heat and moisture transport in internally insulated stone walls. Historic Environment Scotland* (2015).
- [33] WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. Merkblatt 6-4, Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden (Internal thermal insulation according to WTA I: planning guide), (2016),. ISBN: 978-3-8167-9837-8.
- [34] WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. Merkblatt 6-5, Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren (Interior insulation according to WTA II: Evaluation of internal insulation systems with numerical design methods), (2014),. ISBN: 978-3-8167-9246-8.
- [35] N. May, C. Sanders, *Moisture in buildings: an integrated approach to risk assessment and guidance*. British Standards Institution (2014).
- [36] E. ISO, 15148: 2002. *Hygrothermal performance of building materials and products—determination of water absorption coefficient by partial immersion*, (2002).
- [37] CEN, EN 15801: 2009-Conservation of cultural property Test methods. Determination of water absorption by capillarity, CEN, Brussels, Belgium, CEN. European Committee for Standardization. (2009) (accessed November 14, 2017).
- [38] E. Vereecken, S. Roels, Capillary active interior insulation: do the advantages really offset potential disadvantages? *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. 48 (2015) 3009-3021. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-014-0373-9>.
- [39] J. Zhao, J. Grunewald, U. Ruisinger, S. Feng, Evaluation of capillary-active mineral insulation systems for interior retrofit solution, *Building and Environment*. 115 (2017) 215-227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.004>.

- [40] E. Vereecken, S. Roels, Capillary Active Interior Insulation Systems for Wall Retrofitting: A More Nuanced Story, *International Journal of Architectural Heritage*. 10 (2016) 558-569. <http://dx.doi.org/10.1080/15583058.2015.1009575>.
- [41] E. ISO, 12572. Hygrothermal performance of building materials and products -- Determination of water vapour transmission properties -- Cup method, (2016).
- [42] CEN, EN 15803: 2009-Conservation of cultural property Test methods. Determination of water vapour permeability (p) , CEN, Brussels, Belgium, CEN. European Committee for Standardization. (2009) (accessed November 14, 2017).
- [43] H. Künzel, Criteria defining rain protecting external rendering systems, *Energy Procedia*. 78 (2015) 2524-2529. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.260>.
- [44] CEN, EN 15802: 2009-Conservation of cultural property Test methods. Determination of static contact angle, CEN, Brussels, Belgium, CEN. European Committee for Standardization. (2009) (accessed November 14, 2017).
- [45] H.M. Künzel, Flexible vapor control solves moisture problems of building assemblies - smart retarder to replace the conventional PE-film, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*. 23 (1999) 95-102. <http://dx.doi.org/10.1177/109719639902300108>.
- [46] J. Remund, S. Kunz, METEONORM: Global meteorological database for solar energy and applied climatology, *Metetest* (1997).

IV. Kapitula

- [1] M.W. Liddament, *A guide to energy efficient ventilation*, Air Infiltration and Ventilation Centre (1996).254, ISBN: 0946075859.
- [2] Passive House Institute, *Crterios para los Estándares Casa Pasiva, EnerPHit y PHI Edificio de baja demanda energética*. Rheinstr. 44/46, 64283 Darmstadt, Alemania, (2015).

V. Kapitula

- [1] A. Cocchia, *Smart and digital city: A systematic literature review*, *Smart city*, Springer, (2014), pp. 13-43, ISBN: 978-3-319-06159-7.
- [2] L.G. Anthopoulos, *Understanding the smart city domain: A literature review*, *Transforming City Governments for Successful Smart Cities*, Springer, (2015), pp. 9-21, ISBN: 978-3-319-03166-8.
- [3] T.-. Kim, C. Ramos, S. Mohammed, *Smart City and IoT*, *Future Generation Computer Systems*. 76 (2017) 159-162. 10.1016/j.future.2017.03.034.
- [4] P. Rizwan, K. Suresh, M. Rajasekhara Babu, *Real-time smart traffic management system for smart cities by using Internet of Things and big data*, *Proceedings of IEEE International Conference on Emerging Technological Trends in Computing, Communications and Electrical Engineering, ICETT 2016*, (2017), ISBN: 978-1-5090-3751-3.
- [5] X. Zhiqing, H. Jialiang, L. Haidong, *On research IoT-based intelligent parking management system and its design*, *International Journal of Smart Home*. 10 (2016) 217-230. <http://dx.doi.org/10.14257/ijsh.2016.10.5.20>.
- [6] S.P. Gupta, U.K. Pandey, *Automatic and intelligent integrated system for leakage detection in pipes for water distribution network using internet of things*, *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 83 (2018) 516-523. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-63673-3_62.



- [7] S. Wadekar, V. Vakare, R. Prajapati, S. Yadav, V. Yadav, Smart water management using IOT, 2016 5th International Conference on Wireless Networks and Embedded Systems, WECON 2016, (2017), ISBN: 978-1-5090-0893-3.
- [8] D. Meana-Llorián, C. González García, B.C. Pelayo G-Bustelo, J.M. Cueva Lovelle, N. Garcia-Fernandez, IoFClime: The fuzzy logic and the Internet of Things to control indoor temperature regarding the outdoor ambient conditions, Future Generation Computer Systems. 76 (2017) 275-284. <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2016.11.020>.
- [9] A. Fensel, D.K. Tomic, A. Koller, Contributing to appliances' energy efficiency with Internet of Things, smart data and user engagement, Future Generation Computer Systems. 76 (2017) 329-338. <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2016.11.026>.
- [10] C. Gorse, D. Johnston, D. Glew, F. Fylan, F. Thomas, D.M. Shenton, et al., Monitoring and measuring building performance, Building Sustainable Futures: Design and the Built Environment, Springer, (2015), pp. 35-61, ISBN: 978-3-319-19347-2.
- [11] M. Banzi, M. Shiloh, Getting Started with Arduino: The Open Source Electronics Prototyping Platform, Maker Media, Inc. (2014), ISBN: 978-1449363338.
- [12] E. Gertz, P. Di Justo, Environmental monitoring with Arduino: building simple devices to collect data about the world around us, " O'Reilly Media, Inc." (2012), ISBN: 978-1-449-31056-1.
- [13] J. Terés-Zubiaga, C. Escudero, C. García-Gafaro, J.M. Sala, Methodology for evaluating the energy renovation effects on the thermal performance of social housing buildings: Monitoring study and grey box model development, Energy and Buildings. 102 (2015) 390-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.010>.
- [14] A. Erkoreka, E. Garcia, K. Martin, J. Teres-Zubiaga, L. Del Portillo, In-use office building energy characterization through basic monitoring and modelling, Energy and Buildings. 119 (2016) 256-266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.030>.
- [15] J.M. Pearce, Building research equipment with free, open-source hardware, Science. 337 (2012) 1303-1304. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1228183>.
- [16] N. Barroca, L.M. Borges, F.J. Velez, F. Monteiro, M. Górski, J. Castro-Gomes, Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures, Construction and Building Materials. 40 (2013) 1156-1166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.087>.
- [17] J. Hernández, H. Garrecht, G. Paci, S. Reeb, D. García, A ZigBee based Building Management System for heritage, HVAC Journal. 51 (2014) 28-32. ISSN: 1307-3729.
- [18] F.J. Mesas-Carrascosa, D. Verdú Santano, J.E. Meroño, M. Sánchez de la Orden, A. García-Ferrer, Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture, Biosystems Engineering. 137 (2015) 73-83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.005>.
- [19] L.J. Claros-Marfil, J.F. Padiál, B. Lauret, A new and inexpensive open source data acquisition and controller for solar research: Application to a water-flow glazing, Renewable Energy. 92 (2016) 450-461. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.037>.
- [20] F.J. Mesas-Carrascosa, D. Verdú Santano, J.E.M. de Larriva, R. Ortíz Cordero, R.E. Hidalgo Fernández, A. García-Ferrer, Monitoring heritage buildings with open source hardware sensors: A case study of the mosque-cathedral of Córdoba, Sensors. 16 (2016) <http://dx.doi.org/10.3390/s16101620>.
- [21] Smart Citizen, "Smart Citizen Project" Open source technology for citizens political participation in smarter cities. (2016) <https://smartcitizen.me> (accessed November 14, 2017).

- [22] I. Abubakar, S.N. Khalid, M.W. Mustafa, H. Shareef, M. Mustapha, Application of load monitoring in appliances' energy management – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 67 (2017) 235-245. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.064>.
- [23] M. Royapoor, T. Roskilly, Building model calibration using energy and environmental data, *Energy and Buildings*. 94 (2015) 109-120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.050>.
- [24] S. Darby, The effectiveness of feedback on energy consumption. A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and direct Displays, Oxford Environmental Change Institute. (2006) <http://www.eci.ox.ac.uk/research/energy/downloads/smart-metering-report.pdf> (accessed November 14, 2017).
- [25] P.H. Shaikh, N.B.M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, T. Ibrahim, A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 34 (2014) 409-429. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.027>.
- [26] M.W. Ahmad, M. Mourshed, D. Mundow, M. Sisinni, Y. Rezugui, Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research, *Energy and Buildings*. 120 (2016) 85-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.059>.
- [27] European Parliament, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Official Journal of the European Union*. Official Journal of the European Union. (2010) L 153/13. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF> (accessed November 14, 2017).
- [28] European Parliament, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32, *Official Journal of the European Union*. 315 (2012) 1-56. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:en:PDF> (accessed November 14, 2017).
- [29] European Parliament, Directive 2014/32/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments (recast). *Official Journal of the European Union*. L. 96 (2014) 149-250. *Official Journal of the European Union*. 96 (2014) 1-102. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0032&from=EN> (accessed November 14, 2017).
- [30] E. Dave, The Internet of Things. *How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG). (2011) https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/loT_IBSG_0411FIN_AL.pdf (accessed November 14, 2017).
- [31] L. Atzori, A. Iera, G. Morabito, The Internet of Things: A survey, *Computer Networks*. 54 (2010) 2787-2805. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
- [32] G. Says, 6.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2016, Up 30 Percent From 2015. Gartner, Inc. (2015) <http://www.gartner.com/newsroom/id/3165317> (accessed November 14, 2017).



- [33] Q.M. Ashraf, M.I.M. Yusoff, A.A. Azman, N.M. Nor, N.A.A. Fuzi, M.S. Saharedan, et al., Energy monitoring prototype for Internet of Things: Preliminary results, IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2015 - Proceedings, (2015), pp. 1-5, ISBN: 978-1-5090-0366-2.
- [34] Y. Chen, Challenges and opportunities of internet of things, 17th Asia and South Pacific Design Automation Conference, IEEE, (2012), pp. 383-388, ISBN: 978-1-4673-0772-7.
- [35] IOTSWC17, IOT Solutions World Congress. 3-5 October 2017. Barcelona (Spain). (2017) <http://www.iotsworldcongress.com/> (accessed November 14, 2017).
- [36] O. Haque, Pachube. (2004) <http://www.pachube.com> (accessed November 14, 2017).
- [37] ThingSpeak, ThingSpeak: Open source data platform and API for the Internet of Things. (2010) <https://thingspeak.com/> (accessed November 14, 2017).
- [38] Plotly, Plotly: The modern platform for agile business intelligence and data science. (2012) <https://plot.ly/> (accessed November 14, 2017).
- [39] Blynk, Blynk: First drag-n-drop IoT app builder for Arduino, Raspberry Pi, ESP8266, SparkFun boards, and others. (2015) <http://www.blynk.cc/> (accessed November 14, 2017).
- [40] Raspberry Pi Foundation., Official website of Raspberry Pi, (2017) <https://www.raspberrypi.org/> (accessed November 14, 2017).
- [41] Arduino, Official website of free hardware Arduino. (2017) <https://www.arduino.cc/> (accessed November 14, 2017).
- [42] A. Back, Arduino or Raspberry Pi? (2012) <https://www.rs-online.com/designspark/arduino-or-raspberry-pi> (accessed November 14, 2017).
- [43] Espressif-Systems, ESP8266: Low-power, highly-integrated Wi-Fi solution. (2017) <https://espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview> (accessed November 14, 2017).
- [44] L. Aosong-Electronics Co., Temperature and humidity module. AM2302 Product Manual, <http://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/AM2302.pdf> (accessed November 14, 2017).
- [45] SENSIRION, Datasheet SHT21. Humidity and Temperature sensor IC. (2011) https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumentente/2_Humidity_Sensors/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT21_Datasheet_V4.pdf (accessed November 14, 2017).
- [46] Bosch sensortech GmbH, Final data sheet. BMP 180. Digital pressure sensor. (2015) https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMP180-DS000-121.pdf (accessed November 14, 2017).
- [47] Bosch sensortech GmbH, Final data sheet. BME 280. Combined humidity and pressure sensor. (2015) https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BME280_DS001-11.pdf (accessed November 14, 2017).
- [48] WINSEN-Electronics, Intelligent infrared CO2 module (Model: MH-Z19). Users manual. Version 1.0. (2015) <http://www.winsensor.com/d/files/PDF/Infrared%20Gas%20Sensor/NDIR%20CO2%20SENSOR/MH-Z19%20CO2%20Ver1.0.pdf> (accessed November 14, 2017).
- [49] ASTM, 104-85. Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions, ASTM.American Society for Testing and Materials. (1985) <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E104-85R96.htm> (accessed November 14, 2017).

- [50] L. Greenspan, Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards. 81 A (1977) 89-96. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.081A.011>.
- [51] P. Albrecht, J. Otxoa-Errarte, Energy retrofit of the San Roque Social Housing under the standar of the Passive House Institute and the EuroPHit Program. (2016) <http://europhit.eu/san-roque-social-housing> (accessed November 14, 2017).
- [52] ASTM, Standard D6245-12, Standard guide for using indoor carbon dioxide concentrations to evaluate indoor air quality and ventilation, American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA. (2012) <https://www.astm.org/Standards/D6245.htm> (accessed November 14, 2017).
- [53] ANSI/ASHRAE, ASHRAE 62.1-2010 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Atlanta, GA. (2002) <https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/standards-62-1--62-2> (accessed November 14, 2017).
- [54] A. D'Ausilio, Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment, Behavior Research Methods. 44 (2012) 305-313. <http://dx.doi.org/10.3758/s13428-011-0163-z>.
- [55] A. Jáñez Morán, P. Profaizer, M. Herrando Zapater, M. Andérez Valdavida, I. Zabalza Bribián, Information and Communications Technologies (ICTs) for energy efficiency in buildings: Review and analysis of results from EU pilot projects, Energy and Buildings. 127 (2016) 128-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.064>.



Eranskinak

Anexos



8.1. Fundamentos de transporte de humedad en materiales y componentes de construcción.

La humedad es una de las principales preocupaciones en el sector de la edificación. Un incorrecto diseño puede conllevar riesgos inadmisibles para el edificio, unos costes de reparación elevados y afecciones sobre la salud de los usuarios. Debido a ello, este apartado trata de presentar los principios básicos de transporte de humedad que afectan a los componentes y materiales de construcción y que deben de ser considerados para un correcto funcionamiento de los edificios.

Una elevada cantidad de humedad no significa necesariamente que vaya a tener un efecto dañino. Por ejemplo la condensación superficial de una ventana de vidrio monolítico no resulta dañina si dispone de su correspondiente drenaje. Sin embargo, de no ser así, la humedad al resbalar sobre el vidrio y no ser recogida y drenada correspondientemente hacia el exterior entraría en contacto con el propio marco de la ventana y podría dar comienzo así al proceso patológico de degradación. Los efectos negativos que puede llegar a tener la humedad pueden clasificarse según:

-Daños no apreciables:

- Aumento de la conductividad térmica como consecuencia del aumento del contenido de humedad del propio material.
- Aumento del flujo de calor como consecuencia de una mayor transferencia de calor latente.

-Daños apreciables en materiales de madera:

- Daño por moho, hongos y bacterias. Se teme especialmente a los hongos, ya que digieren la celulosa o la lignina y producen agua como producto residual, una combinación que puede desintegrar por completo los compuestos de madera.
- Hinchamiento e hidrólisis de la resina aglutinante en tableros de partículas, paneles de paja, madera contrachapada y OSB. Como resultado, todos pierden fuerza y rigidez, a veces en la medida en que se agrietan cuando se cargan a una fracción de la carga de diseño.

-Daños apreciables en materiales pétreos:

- Crecimiento superficial de pátinas bióticas de musgo, algas o líquenes. Es principalmente un problema estético, aunque las raíces de los musgos pueden degradar las juntas de mampostería, mientras que los ácidos orgánicos que producen pueden iniciar la corrosión del metal.



- Ataque de sales solubles. La hidratación y la cristalización deben ser evitadas. El ataque de sal puede pulverizar completamente un material de piedra.
- Reacciones químicas que degradan el material. Los ejemplos son la carbonatación en concreto, la reacción de silicato alcalino, etc.
- Daño por helada que produce el desprendimiento de la piedra.

-Daños apreciables en materiales metálicos:

- Corrosión. En muchos casos, la expansión del volumen acompaña a la corrosión. Esta es la razón por la cual el hormigón armado 'decae', un fenómeno causado por barras de refuerzo corroídas. Los óxidos metálicos también son porosos e higroscópicos y se hinchan cuando se vuelven húmedos.

-Daños apreciables en materiales sintéticos:

- Hidratación. El material sintético se debilita y pierde su cohesión con el tiempo.
- Las espumas a veces experimentan una deformación irreversible por la acción combinada de la temperatura y las fluctuaciones de presión de vapor en los poros.

Una vez presentados los efectos que puede llegar a tener la humedad sobre los edificios resulta fundamental conocer la razón de su origen y poder así evitar futuras patologías. Los edificios se ven afectados por múltiples fuentes de humedad que establecen las condiciones iniciales y de contorno sobre los materiales, los componentes y los edificios. El aire húmedo se transfiere a través de los materiales de la envolvente que responden según sus propiedades higrotérmicas y las condiciones de contorno. Dichas fuente de humedad pueden ser clasificadas según su origen y estado:

-Agua líquida:

- Accidental: producida por roturas de tuberías de suministro de agua o de evacuación que provocan focos puntuales de humedad.
- Humedad capilar: es la humedad procedente del terreno que asciende por efecto capilar a través de los muros del edificio.
- Humedad de filtración: procedente de la lluvia exterior que penetra al interior del edificio a través de las fachadas o cubiertas.
- Humedad de obra: aquella generada en el proceso de construcción del edificio cuyo contenido disminuye con el paso del tiempo mediante el proceso de secado.

-Vapor de agua:

- **Humedad relativa:** los materiales higroscópicos tienden a buscar un equilibrio con la humedad del entorno mediante el proceso adsorción y desorción de humedad a través de sus poros.
- **Condensación superficial:** es aquella humedad producida por condensación del vapor de agua de un ambiente y que puede darse tanto en la cara superficial interior como la exterior de un edificio.
- **Condensación intersticial:** este fenómeno se produce dentro de un material o entre capas de distintos materiales y por lo tanto, al contrario que la condensación superficial, permanece oculto hasta que es detectado mediante una cata de supervisión o se ha producido una patología derivada como puede ser un goteo de agua o la pudrición o la corrosión de materiales.

Los principios de la teoría de transporte de humedad son amplios y a través de la investigación está en constante evolución. En esta sección tiene como objetivo presentar la base teórica sobre la que se apoya la materia de transporte de humedad en los materiales y componentes de construcción y poder comprender así el fenómeno sobre el que se sustenta gran parte de la presente tesis.

El transporte de humedad en los materiales es similar al proceso de transporte de calor, un proceso de difusión. Las ecuaciones y condiciones de contorno son similares:

- Conservación de masa en lugar de conservación de energía.
- Los flujos de humedad son producidos por gradientes del potencial de humedad en lugar de los flujos de calor causados por gradientes de temperatura.

No obstante, también existen grandes diferencias:

- El potencial de la presión parcial de vapor tiene un valor máximo (la presión de saturación) contrariamente a la temperatura.
- El contenido de humedad de un material tiene un valor máximo mientras que el contenido de calor no tiene límite en las condiciones ambientales relevantes.
- La humedad puede evaporar dando como resultado una fuente de vapor o condensar siendo un foco de condensación.
- La difusión de humedad puede ocurrir en forma de vapor o agua. El potencial del vapor de agua es la diferencia de presión parcial de vapor y para el agua líquida la presión capilar, la humedad relativa o el contenido de humedad.



- La relación entre contenido de calor y temperatura es menos compleja que la relación no lineal entre el contenido de humedad y el potencial de humedad. Además la histéresis existente aumenta el grado de complejidad de la relación.
- Los coeficientes de transporte dependen estrechamente del contenido de humedad siendo así una relación no lineal.
- La estructura del poro de los materiales determina las propiedades de humedad del mismo. Dos materiales aparentemente similares, como pueden ser dos ladrillos, con la misma densidad y conductividad térmica pueden tener propiedades frente a la humedad completamente diferentes.

8.1.1. Almacenamiento de humedad en materiales de construcción

Muchos de los materiales de construcción son porosos. Dichos poros proveen de una elevada superficie interna que generalmente tiene una afinidad con las moléculas de agua. La cantidad de humedad de estos materiales higroscópicos está relacionada con la humedad relativa del entorno que lo rodea. Cuando la humedad relativa aumenta, los materiales higroscópicos ganan humedad (adsorción), y cuando la humedad relativa baja pierden humedad (desorción). La relación entre el contenido de humedad del material y la humedad relativa a una temperatura determinada queda representada mediante la isoterma de sorción, Figura 1. 1. La isoterma de adsorción y la de desorción no son idénticas, y a esta diferencia se le denomina histéresis.

El contenido de humedad de equilibrio aumenta con la humedad relativa del entorno que lo rodea, especialmente por encima del 80%, denominado contenido práctico de humedad (w_{80}). En los materiales el contenido de humedad puede variar desde el estado seco hasta el estado completamente saturado cuando los poros abiertos están completamente llenos de agua. Este estado de saturación es conocido como contenido máximo de humedad (w_{max}). Esta absorción por parte del material se da experimentalmente al vacío, por lo que en condiciones normales el contenido de saturación se produce con valores menores y se denomina saturación libre (w_f) o también contenido de humedad de saturación capilar (w_{sat}).

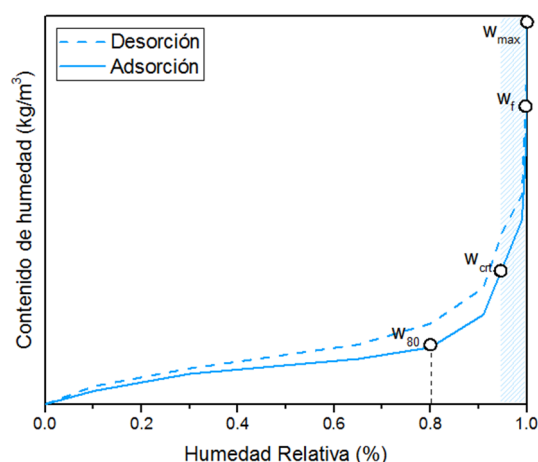


Figura 1. 1- Isoterma de sorción de un material poroso de construcción.

Los materiales porosos también absorben agua líquida cuando ambos entran en contacto. La humectación puede ser tan completa que puede llegar a saturación libre (w_f) cuando los poros de mayor tamaño se llenan de agua. No obstante, los contenidos de humedad por encima del contenido de humedad crítico (w_{cr}) no pueden lograrse únicamente por adsorción de vapor, porque es a partir de este punto cuando comienza el transporte de humedad en fase líquida y dando comienzo a la denominada región de transporte capilar. Esto se hace evidente cuando diferentes materiales porosos se ponen en contacto directo (capilar) entre sí. En ese caso, hay flujo capilar de un material al otro hasta que todos los poros de un determinado tamaño se llenan con agua en ambos materiales; todos los poros con tamaños superiores a este límite permanecen vacíos porque los capilares más pequeños tienen una fuerza de succión más alta que los más grandes. Este fenómeno se usa para determinar la función de almacenamiento de humedad por encima del 95% de humedad relativa, que representa el límite de las pruebas de sorción de vapor en cámaras climáticas.

Para ello se emplea el equipo de placas a presión en el que se colocan las muestras de material saturado con agua sobre una membrana porosa permeable al agua pero impermeable al aire. Se aplica una presión en diferentes pasos hasta llegar a un equilibrio capilar. El contenido de humedad de equilibrio en cada paso de presión se determina mediante el pesado de muestras. La función de almacenamiento de humedad desde presión cero (saturación libre al 100%) hasta los 10 MPa, que corresponde aproximadamente al 93% de humedad relativa, se define trazando el contenido de humedad en cada paso de presión aplicado, Figura 1. 2.

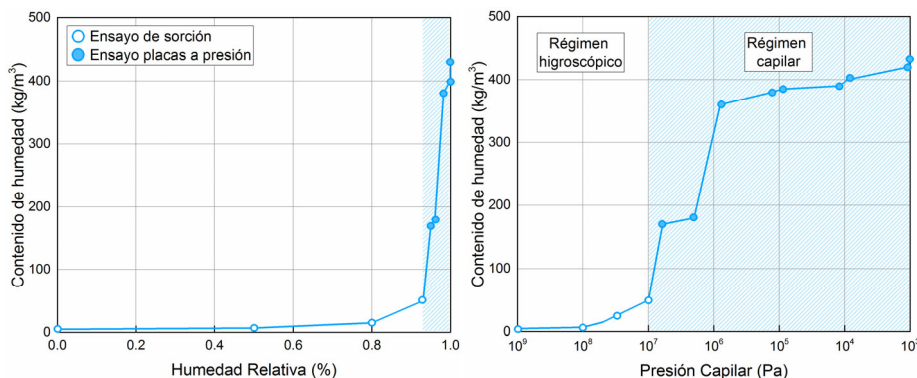


Figura 1. 2- Isotherma de sorción y curva de retención de un material.

Para una función de almacenamiento de humedad continua desde el estado seco al 100% de humedad relativa, se combinan la isoterma de sorción y la curva resultante de la prueba de la placa de presión, ya sea convirtiendo la presión de succión en humedad relativa o viceversa, usando la ecuación de Kelvin:

Donde:

ϕ = humedad relativa del aire en los poros

P_k = presión de succión capilar, Pa

ρ_w = densidad del agua, kg/m³

R_D = constante de gas para el vapor de agua, J/(Kg·K)

T = temperatura absoluta, K

$$\phi = \exp\left(-\frac{P_k}{\rho_w R_D T}\right)$$

La literatura ofrece expresiones matemáticas para poder representar la isoterma de sorción en aquellos casos en los que no ha sido posible realizar los ensayos completos. De esta manera se consigue obtener de una manera simplificada el contenido de humedad en función de unos coeficientes de ajuste.

El modelo más extendido es el sugerido por Kunzel [49] mediante el empleo del contenido de humedad en saturación libre (w_f), la humedad relativa (ϕ) y el coeficiente de ajuste b ($b > 1$).

$$w(\phi) = w_f \frac{(b - 1) \cdot \phi}{b - \phi}$$

La determinación del coeficiente de ajuste b se obtiene sustituyendo los valores mediante el uso del contenido de humedad w_{80} . El empleo de este modelo permite obtener valores muy próximos a los de medición en la mayoría de los materiales de construcción. Sin embargo, únicamente se recomienda su empleo para fines de estimación ya que no siempre su uso es adecuado para algunos materiales de construcción como puede ser el hormigón, Figura 1. 3.

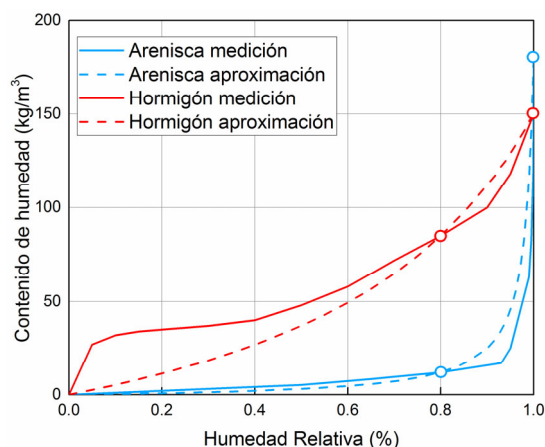


Figura 1. 3- Comparativa de la curva de sorción de dos materiales mediante los valores de medición y los de aproximación.

8.1.2. Mecanismos de transporte de humedad

Los mecanismos de transporte de agua líquida y vapor de agua que se dan en los materiales de construcción son los siguientes:

- Difusión de vapor de agua por los gradientes de presión parcial de vapor de agua.
- Difusión superficial.
- Transporte líquido debido a la succión capilar de agua en los poros del material.
- Flujo líquido producido por efecto gravitacional.
- Desplazamiento de vapor de agua por el movimiento convectivo del aire.

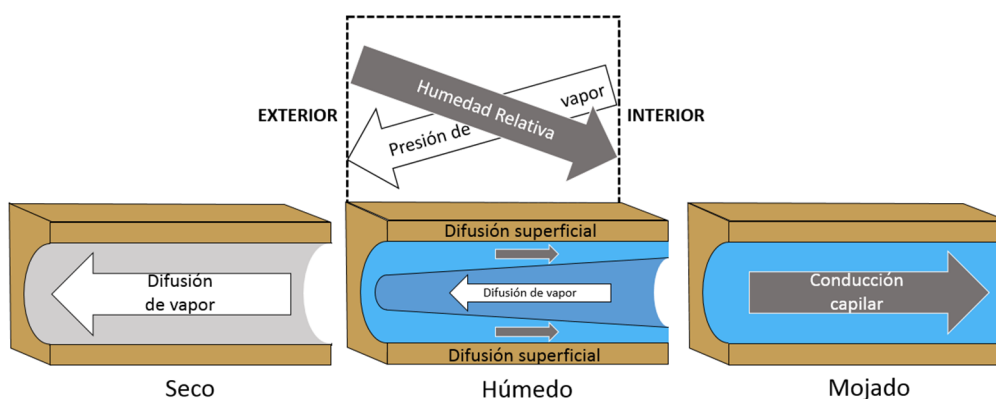


Figura 1. 4- Mecanismos de transporte de humedad en un material higroscópico poroso de construcción bajo condiciones climáticas de invierno.

La Figura 1. 4. muestra el efecto combinado de los mecanismos de transporte mencionados a través de una representación de un capilar en un material de construcción expuesto a condiciones interiores y exteriores. Dichas condiciones representan la exposición ante la que se encuentra habitualmente un edificio, es decir



una mayor presión parcial de vapor en el interior y una mayor humedad relativa en el exterior. Como consecuencia, tal y como se muestra en el ejemplo el transporte de difusión de vapor y el transporte líquido de agua se producen en sentido opuesto. Es decir, la difusión de vapor desde ambiente cálido al frío mientras que el transporte líquido del entorno húmedo al seco.

Por otro lado, si el material contiene suficiente humedad higroscópica (aproximadamente a humedades superiores al 60%) la película generada en los poros por la adsorción de humedad se vuelve móvil conociéndose este fenómeno como difusión superficial. El espesor de la película generada y su velocidad de transporte aumenta con la humedad relativa desde las regiones con mayor concentración a regiones con menor concentración de humedad. Es decir, la humedad relativa representa la fuerza motriz del fenómeno de transporte, al contrario que en la difusión del vapor que es la presión parcial de vapor por lo que ambos fenómenos de transporte se producen en sentido opuesto. Por lo tanto, la difusión superficial debe de considerarse como una parte del transporte líquido y no como una parte de difusión de vapor tal y como suele asumirse frecuentemente. De esta manera, cuando la humedad relativa aumenta, lo hace también el espesor de la película y el fenómeno de difusión superficial da inicio al transporte por conducción capilar.

Por otra parte, el flujo líquido producido por efecto gravitacional representa un caso muy particular despreciable y que no se suele considerar en las evaluaciones higrotérmicas. En cuanto al el transporte de humedad por efecto convectivo también se ignora debido a que la hermeticidad al aire es un requisito esencial establecido a los muros de construcción como medida para mejorar la eficiencia energética a través de la limitación de las pérdidas energéticas producidas por las infiltraciones y exfiltraciones.

Como se ha observado, los materiales están compuestos por una estructura compleja de poros, donde a nivel de superficie se dan diferentes fracciones de transporte en fase líquida y fase vapor. Debido a ello, ambos fenómenos son tratados de una manera paralela mediante la expresión de transporte de humedad. Por un lado mediante la presión parcial de vapor como impulsor del transporte en fase de vapor y por otro lado la succión capilar o la humedad relativa como impulsora del transporte de humedad en fase líquida. La expresión queda definida de la siguiente forma:

Donde:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla(g_w + g_v) + S_w$$

w = contenido de humedad del material, kg/m³

g_w = flujo de agua líquida, kg/(m²·s)

g_v = flujo de vapor de agua, kg/(m²·s)

S_w =fuente de humedad, $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$

T = temperatura absoluta, K

- Flujo de vapor de agua por difusión

El vapor de agua migra por difusión a través del aire y los materiales de construcción, normalmente en pequeñas cantidades. La ecuación utilizada para calcular el flujo de vapor de agua por difusión a través de materiales se basa en la ley de Fick para la difusión de un gas muy diluido (vapor de agua) en un sistema binario (vapor de agua y aire seco):

$$g_v = -\delta_p \nabla p = -\frac{\delta_a}{\mu} \nabla p$$

$$\delta_a = \frac{2.0 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0.81}}{P_n}$$

Donde:

g_v = flujo de vapor de agua, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

$\bar{\delta}_p$ = permeabilidad al vapor de agua, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$

$\bar{\delta}_a$ = permeabilidad al vapor de agua del aire, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$

μ =factor de resistencia a la difusión del vapor de agua, (-)

p = presión parcial de vapor de agua, Pa

T = temperatura, K

P_n =presión atmosférica normal, Pa

Como puede observarse, la ecuación de difusión de vapor de Fick puede simplificarse empleando el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua (μ) que es característico para cada material de construcción y la permeabilidad al vapor de agua del aire ($\bar{\delta}_a$).

El coeficiente de difusión del vapor de agua del aire ($\bar{\delta}_a$) es la capacidad del aire para dejar pasar el agua en forma gaseosa por mecanismos que se abordarán que relaciona la temperatura del aire y su presión. De esta manera, la permeabilidad al vapor de agua de un material ($\bar{\delta}_p$) relaciona las propiedades del aire ($\bar{\delta}_a$) y las del material (μ).

El factor μ indica cuántas veces la permeabilidad al vapor de un material es menor que en el aire estancado, en las mismas condiciones de temperatura y presión total. El valor más bajo del factor de resistencia a la difusión de vapor es uno e infinito el valor más alto (para un material con poros cerrados o sin poros). El valor real depende del sistema de poros que viene determinado por los siguientes factores:

1-Área abierta de poro por unidad de superficie. El valor μ de un material con elevada área de poro abierta será bajo, mientras que un material con un valor bajo de área ofrecerá una elevada resistencia a la difusión de vapor y a la convección.

2-La longitud de la trayectoria del poro L que deben de seguir las moléculas.

3-La tortuosidad del sistema de poros es otro de los parámetros que afecta notablemente a la difusión de vapor.

4-La humedad relativa en los poros del material es otro de los aspectos fundamentales. Como se ha citado anteriormente, en los poros se produce la difusión pura, la difusión superficial y el transporte capilar en función de la humedad relativa en el poro. En este proceso los poros van rellenándose creando así unos islotes entre los que también se produce una difusión de vapor y con lo que se consigue acortar así la longitud de la trayectoria. Este efecto tiene como resultado una disminución de la resistencia a la difusión de vapor a medida que aumenta el contenido de humedad del material, Figura 1. 6. Este efecto se suele describir con la siguiente relación:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + a \varphi^n}$$

Donde:

μ_0 = factor de resistencia a la difusión del vapor de agua del material seco.

a, n = constantes dependientes del material.

φ = humedad relativa.

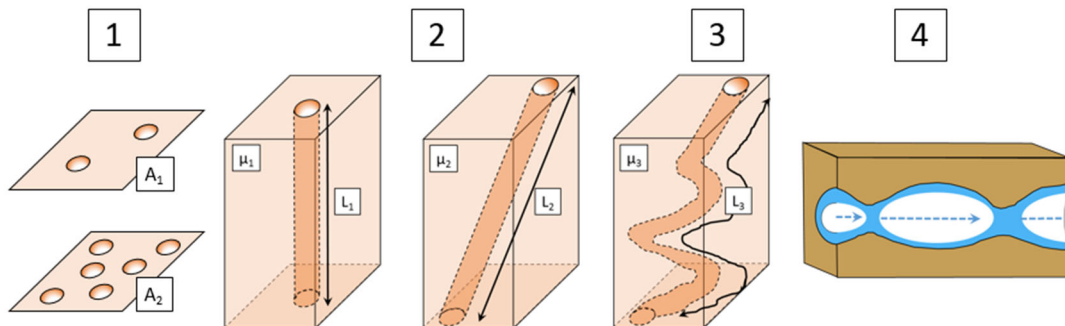


Figura 1.5- Factores de influencia sobre la resistencia a la difusión de vapor (μ).

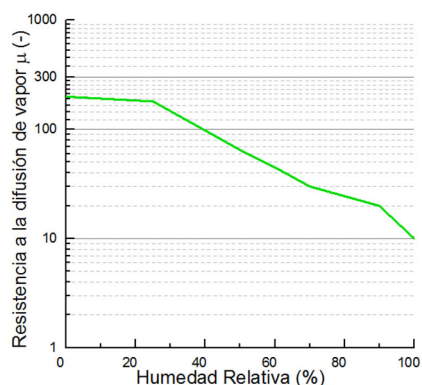


Figura 1. 6- Factor de Resistencia a la difusión de vapor μ de una madera.

El factor μ permite caracterizar la difusión de vapor del material teniendo en consideración los factores mencionados y debido a ello su caracterización se hace a diferentes humedades relativas. El principio del ensayo [50,51], conocido como ensayo de copa, se basa en la diferencia de pesaje de la muestra producida por la diferencia de presión parcial de vapor entre el interior de la copa y la cámara en la se encuentra cuya temperatura y humedad está controlada. De esta manera se genera un flujo de vapor de agua unidimensional a través de los materiales permeables que es lo que produce la diferencia de pesadas. El interior de la copa contiene un desecante o una solución acuosa saturada según el ensayo a realizar (copa seca o copa húmeda) para obtener así una presión parcial de vapor interior determinada. Conocido el flujo de vapor de agua a través de las diferencias de pesadas, el área de la muestra y la diferencia de presión parcial de vapor generada en ambos lados de la muestra se obtienen las siguientes propiedades:

Donde:

$$g = \frac{G}{A}$$

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p}$$

$$Z = \frac{1}{W}$$

$$\delta_p = W \cdot d$$

G = flujo de vapor de agua a través de la muestra, kg/s.

A = Área de la muestra, m².

g = densidad de flujo de vapor de agua, kg/m²s.

W= permeancia al vapor de agua con respecto a la presión de vapor parcial, kg/m²sPa.

Δp = diferencia de presión parcial de vapor a través de la muestra, Pa.

Z= resistencia al vapor de agua con respecto a la presión de vapor parcial, m²sPa/ kg.

d= espesor de la muestra, m.

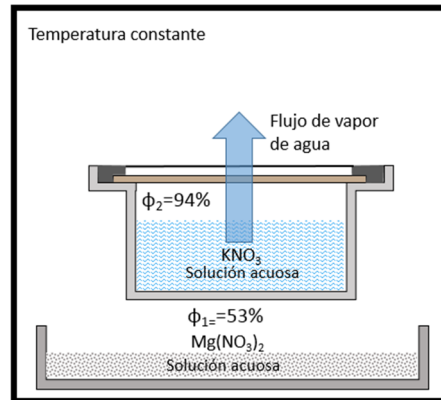


Figura 1. 7- Esquema de ensayo de copa húmeda para la determinación de las propiedades de transmisión de vapor de materiales porosos.

- Flujo de agua por succión capilar

La fuerza impulsora de la conducción capilar es la tensión de succión causada por la fuerza de tensión superficial. Esto se calcula de acuerdo con el modelo de tubos cilíndricos lisos, cuestionable en su relación con la realidad de los poros del sistema en un material de construcción, pero el único modelo simple generalizable.

Suponiendo unos poros dirigidos verticalmente, se puede suponer que la fuerza de tensión superficial dirigida es:

$$F = 2\pi r \sigma \cos\theta$$

Un factor importante que determina la tensión de succión es la curvatura de la superficie del agua por la pared del poro, y especialmente el ángulo al que la superficie alcanza la pared, θ . El ángulo de humectación por contacto es el ángulo entre el menisco del agua y la superficie capilar. Cuanto menor sea este ángulo, mayor será la succión capilar. En materiales hidrófilos (que atraen el agua), el ángulo de humectación de contacto, Figura 1. 8, es inferior a 90° ; en materiales hidrófobos (hidrófugos), está entre 90 y 180° .

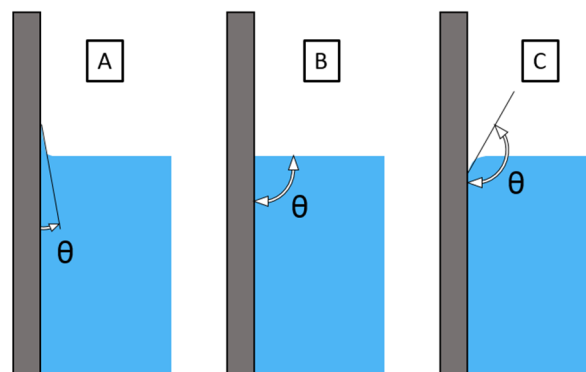


Figura 1. 8-Ángulo de contacto

Dentro de pequeños poros de un diámetro equivalente de menos de 0.1 mm, la atracción molecular entre la superficie y las moléculas de agua causa la succión capilar, definida como:

$$P_k = \frac{F}{A} = \frac{2\pi r \sigma \cos\theta}{\pi r^2} = \frac{2\sigma \cos\theta}{r}$$

Donde:

P_k = presión de succión capilar, Pa

σ = tensión superficial del agua, N/m

θ = ángulo de contacto, grados.

r = radio equivalente capilar, m.

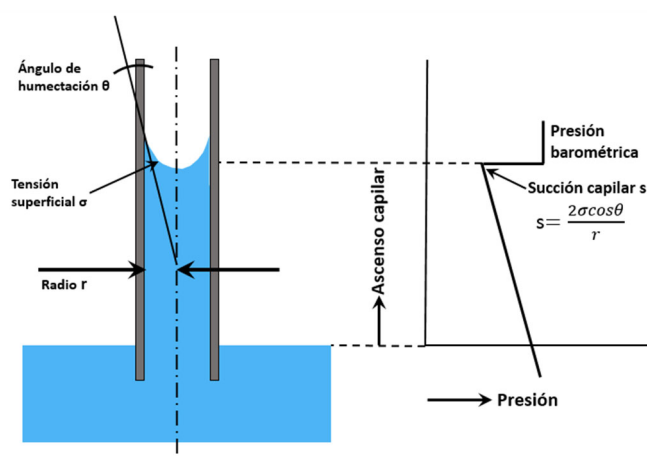


Figura 1. 9-Ascenso capilar en materiales hidrofílicos.

En cuanto a la densidad de flujo en forma líquida, g_w , se calcula a partir de la ley de Darcy, gobernada por el gradiente de succión capilar y que viene dada por la expresión:

$$g_w = -K_1 \nabla P_k$$

Donde:

K_1 = coeficiente de permeabilidad, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$

P_k = presión de succión capilar, Pa

Alternativamente, la ecuación puede ser transformada a través de la relación de Kelvin mencionada anteriormente:

$$g_w = -K_2 \frac{T}{\varphi} \nabla \varphi - K_2 \ln \varphi \nabla T$$

Donde:

$K_2 = K_2 \cdot \rho_w \cdot R_D$, coeficiente de conducción capilar, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$

P_k = presión de succión capilar, Pa



El segundo término de la ecuación es el transporte capilar relacionado con el gradiente de temperatura, que es pequeño en comparación con el primer término. Además cuando ϕ se aproxima a 1, el producto tiende a cero. Por lo tanto se puede despreciar dicho término y sustituir la succión capilar por la humedad relativa como potencial bajo el que queda gobernada la expresión:

Donde:

$$g_w = -D_\phi \nabla \phi$$

D_ϕ = coeficiente de conducción de líquido, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$

ϕ = presión capilar, Pa

El coeficiente de conducción líquido, D_ϕ , puede ser calculado a partir del coeficiente de transporte líquido D_w ($\text{m}_2\cdot\text{s}^{-1}$):

$$D_\phi = D_w \frac{\partial w}{\partial \phi}$$

Para la determinación difusividad del agua en función del contenido de humedad, se pueden emplear métodos basados en RMN (resonancia magnética nuclear), rayos gamma o técnicas microondas. También se han desarrollado otros métodos [52,53] que son empleados habitualmente basados en el coeficiente de absorción capilar A_w [54,55]. Según el modelo de Kunzel [49] a partir del ensayo de absorción capilar y conociendo el contenido de humedad en saturación libre (w_f) del material la difusión capilar por succión queda definida de la siguiente manera:

$$D_{ws} = 3.8 \left(\frac{A_w}{w_f} \right) 1000 \left(\frac{w}{w_f} \right)^{-1}$$

Esta aproximación es adecuada para materiales de construcción que están en contacto directo con el agua para periodos de tiempo cortos tal y como puede ser ante el efecto de la lluvia. Para el caso del transporte capilar por redistribución, Kunzel propone corregir el valor reduciendo un valor decimal al correspondiente valor por succión.

Por lo tanto, desarrollando las ecuaciones mencionadas hasta ahora, la transferencia de calor y masa puede ser escrita a través de la siguiente expresión:

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + h_v \nabla (\delta_p \nabla (\phi p_{sat}))$$

$$\frac{\partial w}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla (D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{sat}))$$

8.1.3. Condiciones de contorno y focos de humedad

Los mecanismos de transporte de humedad se producen principalmente dentro y entre los materiales. Pero al igual que ocurre en transferencia de calor, hay una resistencia superficial, determinada por la velocidad del viento y la geometría de la superficie. La transferencia de vapor desde el aire a la superficie, o viceversa, se ve afectada por la resistencia debido a la existencia de una capa límite de aire. De manera análoga a la transferencia de calor, se puede representar mediante el coeficiente de transporte de vapor superficial β_v y las diferencia de presión de vapor del aire y superficial de la pared. El coeficiente de transferencia de vapor de agua depende de la velocidad de aire próxima a la superficie de la pared y por lo tanto puede derivarse del coeficiente de transferencia de calor por convección, α_c , a través de algunas simplificaciones de la relación de Lewis.

Donde:

$$g_v = \beta_v(p_a - p_s)$$

$$\beta_v = 7 \cdot 10^{-9} \alpha_c$$

g_v = densidad de flujo de vapor de agua, $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$.

β_v = coeficiente de transferencia de vapor de agua, $\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$.

p_a = presión de vapor de agua ambiental, Pa.

p_s = presión de vapor de agua sobre la superficie del componente de construcción, Pa.

α_c = coeficiente de convección, $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

La lluvia es otro de los aspectos que tiene un notable efecto sobre el comportamiento higrotérmico de las fachadas de los edificios. Existen varios modelos que permiten el cálculo de la incidencia de lluvia todos basados tanto en métodos analíticos como empíricos. Uno de los métodos más empleados es el modelo semi-empírico de ISO [56] que estima la cantidad de lluvia que alcanza la superficie de la pared basándose en la cantidad de lluvia horizontal, la velocidad del viento y su dirección. El supuesto teórico básico es que, siempre que todas las gotas de lluvia sean del mismo tamaño, el flujo del viento es horizontal, constante y uniforme en todas las alturas y se dirige perpendicularmente a la superficie en todo momento. De esta manera la densidad del flujo de humedad debido a la lluvia, denominado como índice batiente de lluvia local, sobre una fachada con una orientación determinada puede calcularse como:

Donde:

$$I_s = \frac{2}{9} v r^{8/9} \cos(D - \theta)$$

I_s = índice batiente de lluvia local, l/m^2 .

v = velocidad media horaria de viento, m/s .

r = lluvia total horaria, mm .



D= dirección media horaria de viento respecto al norte, °.

Θ= orientación media del muro respecto al norte, °.

Sin embargo, las condiciones reales de lluvia sobre una fachada pueden cambiar considerablemente debido a elementos que pueden perturbar a la densidad del flujo de lluvia como de rugosidad de terreno (C_R), el coeficiente topográfico (C_T), el factor de obstrucción (O), y el factor de captación (W). Aplicando dichos coeficientes que corrigen el índice batiente de lluvia local (I_S) se obtiene el índice de lluvia batiente de referencia (I_W) consiguiendo de una manera más fiel representar el efecto de la lluvia sobre una fachada:

$$I_W = I_S C_R C_T O W$$

El coeficiente de rugosidad C_R tiene en cuenta la variabilidad de la velocidad media del viento en el lugar debido a la altura por encima del nivel del suelo y la rugosidad del terreno en la dirección que sopla el viento. El coeficiente de rugosidad para la altura z viene determinado por:

Para $z \geq z_{min}$:

$$C_R(z) = K_R \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Para $z < z_{min}$:

$$C_R(z) = C_R(z_{min})$$

Donde:

z = altura por encima del nivel del suelo, m.

K_R = factor de terreno.

z_0 = longitud de rugosidad aerodinámica, m.

z_{min} = altura mínima, m.

C_R = coeficiente de rugosidad.

Categoría del terreno	Descripción	K_R	z_0	z_{min}
I	Terreno rugoso abierto al mar; orilla de lago con al menos 5 km de agua libre en contra del viento, y terreno plano y liso sin obstáculos.	0.17	0.01	2
II	Terreno agrícola con vallados limítrofes, pequeñas granjas dispersas, casas o árboles.	0.19	0.05	4
III	Zonas suburbanas o industriales y bosques permanentes.	0.22	0.3	8
V	Zonas urbanas con al menos el 15% de la superficie cubierta con edificios de altura media superior a 15m.	0.24	0.1	16

El coeficiente topográfico C_T tiene en cuenta el aumento de la velocidad media del viento en colinas y taludes aislados, y está relacionado con la velocidad del viento soplando de cara en la colina o talud.

Para $\Phi < 0.05$

$$C_T = 1$$

Para $0.05 \leq \Phi \leq 0.3$

Donde:

s = factor que se obtiene de las figuras A y B, para la escala de la longitud de la pendiente

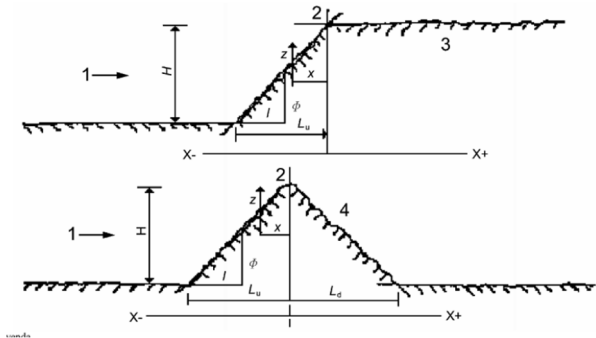
$$C_T = 1 + 2s\phi$$

Para $\phi > 0.3$

$$C_T = 1 + 0.6s$$

en contra del viento, L_u o de la pendiente a favor del viento, L_d , representadas en la figura 1.

ϕ = es la pendiente en contra del viento, H/L_u , medida en la dirección del viento.



Leyenda:

1: Viento

2: Cresta

3: Pendiente a favor del viento < 0.05

4: Pendiente a favor del viento > 0.05

L_u : Longitud real de la pendiente en contra del viento medida en la dirección del viento

L_d : Longitud real de la pendiente a favor del viento

L_e : Longitud útil de la pendiente en contra del viento

Pendiente en contra del viento ϕ (H/L_u)	
Poco pronunciada ($0.05 \leq \phi \leq 0.3$)	Pronunciada ($\phi > 0.3$)
$L_e = L_u$	$L_e = H/0.3$

H: altura útil del relieve

x: distancia horizontal del emplazamiento respecto a la cima de la cresta

z: distancia vertical respecto al nivel del suelo del emplazamiento

Figura A:

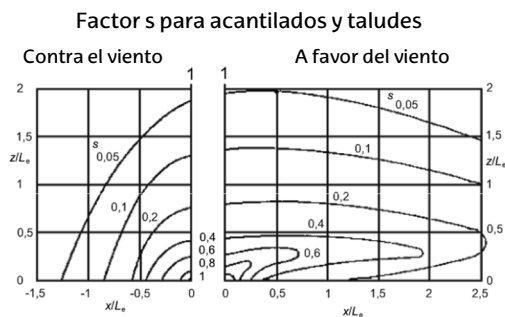
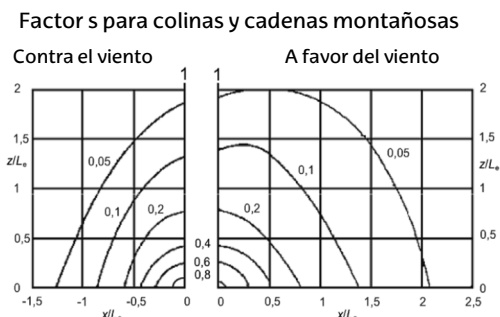


Figura B:

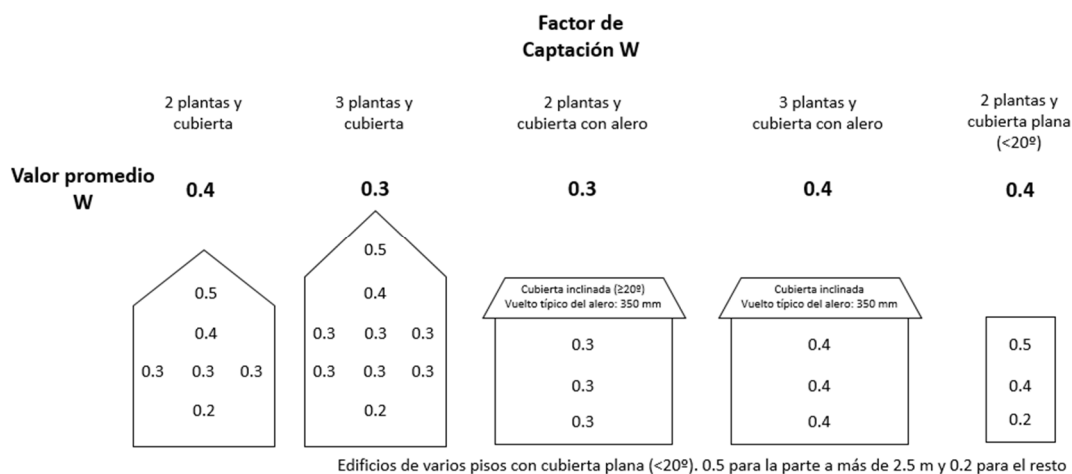


El coeficiente de obstrucción O del muro permite evaluar el efecto de protección que ofrecen aquellos obstáculos que son al menos tan altos como el muro en función de la distancia a la que se encuentren. Si la configuración del emplazamiento es susceptible de analizar los vientos hacia el muro, se debe de considerar un factor de obstrucción de 1.0 incluso si hay obstrucciones.

Distancia entre la obstrucción y el muro (m)	Factor de obstrucción O
--	-------------------------

$4 \leq d \leq 8$	0.2
$8 < d \leq 15$	0.3
$15 < d \leq 25$	0.4
$25 < d \leq 40$	0.5
$40 < d \leq 60$	0.6
$60 < d \leq 80$	0.7
$80 < d \leq 100$	0.8
$100 < d \leq 120$	0.9
$d > 120$	1.0

Por último, el factor de captación W permite considerar los efectos de la altura del muro, el tipo de cubierta y la protección que ofrece al muro:



Otra de las posibles fuentes de humedad son las ocurridas por los efectos convectivos producidos por las diferencias de presión a través de las grietas. En ellas se producen fugas de aire que pueden producir patologías en el interior de los cerramientos. A diferencia de las fugas de energía en las que el aire permanece caliente porque atraviesa un corto recorrido desde el interior hacia el exterior, las fugas de humedad son canales pequeños y tortuosos donde el flujo de aire es lento y se enfría en la trayectoria del flujo, Figura 1. 10.

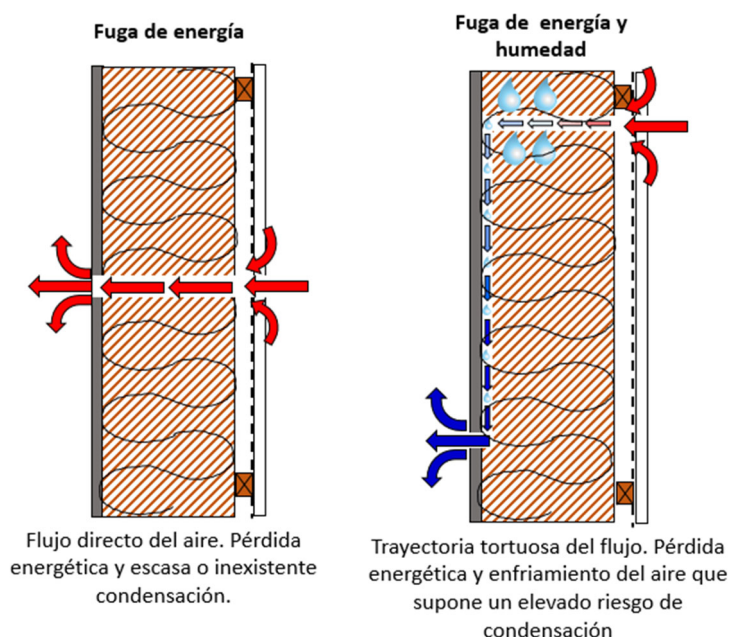


Figura 1. 10- Fugas de energía y humedad producidas en las envolventes de los edificios producidas por grietas.

La fuente de humedad convectiva es igual a la cantidad de condensado que se forma cuando la temperatura del aire interior se enfría a la temperatura del plano de condensación seleccionado en el conjunto de construcción. De esta manera, la cantidad de condensación queda determinada mediante la siguiente expresión:

Donde:

S_{CL} : fuente de humedad debido a la infiltración de vapor en el componente, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})$.

q_{CL} : flujo de aire a través de la grieta, $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$.

c_i : concentración de vapor de agua del aire interior, kg/m^3 .

$c_{sat,p}$: concentración de saturación de vapor de agua en la posición p , donde se espera condensación debido a la penetración de aire en el interior, kg/m^3 .

k_{CL} : permeabilidad al aire específica del componente, $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{hPa})$.

ΔP : diferencia de presión entre el interior y el exterior, Pa.

ρ : densidad del aire exterior, kg/m^3 .

T_e, T_i : temperatura interior y exterior, K.

g : constante gravitacional, $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$.

h : altura del recinto evaluado, m.

$$S_{CL} = q_{CL}(c_i - c_{sat,p})$$

$$q_{CL} = k_{CL}\Delta P$$

$$\Delta P = \rho \frac{T_e - T_i}{T_i} g \frac{h}{2}$$



Las diferencias de presión entre el interior y el exterior son aquellas generadas por efecto Stack y los sistemas de ventilación. Los efectos del viento no se toman en consideración en estos cálculos debido a su efecto transitorio y puntual. Por último, el coeficiente de permeabilidad específica k_{cl} toma valores de $0.07 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{hPa})$ para edificios con una elevada calidad de ejecución, $0.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{hPa})$ en edificios con calidad media y $0.33 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{hPa})$ para aquellos de baja calidad constructiva.

8.2. Códigos desarrollados

8.2.1. Equipo conductividad térmica

```
/*
        ****EQUIPO CONDUCTIVIDAD TÉRMICA****
    Código desarrollado para la obtención de los perfiles de temperatura en el
    equipo desarrollado. El equipo obtiene mediante 16 NTC de 10kOhm el valor de
    resistencia a través de un multiplexor MUX74HC4067 de 16 canales que son leídos
    a través de la entrada analógica A0. A continuación los valores son registrados
    mediante una memoria microSD en un archivo .txt con un intervalo de tiempo de
    1 minuto y son mostrados a través de una pantalla LCD2004.
*/

//Librería multiplexor
#include "MUX74HC4067.h"
// Conexión con MUX74HC4067
// Puertos de conexión (EN, S0, S1, S2, S3) a los PIN del microcontrolador
(2 , 3, 4 ,5 ,6) .
MUX74HC4067 mux(2, 3, 4, 5, 6);

// Configuración Datalogger SD formateado FAT32.
// Puertos de conexión: CS:10, SCK:13, MOSI:11, MISO:12, VCC: 5V, GND:GND
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
const int chipSelect = 10;

// Configuración LCD 2004.
// Puertos de conexión: SDA: A4; SCL:A5: VCC: 5V, GND:GND
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>//Recuerda descargar la libreria en
electrocrea.com
LiquidCrystal_I2C lcd(0X3F, 2, 1, 0, 4, 5, 6, 7, 3, POSITIVE);//Direccion de
LCD

//Configuración sensores DHT22/11
#include "DHT.h"

#define DHT1PIN 9
#define DHT1TYPE DHT22 // DHT 11
DHT dht1(DHT1PIN, DHT1TYPE);

#define DHT2PIN 8 // what pin we're connected to
#define DHT2TYPE DHT22 // DHT 11 (AM2302)
DHT dht2(DHT2PIN, DHT2TYPE);

//Configuración RTC_DS1307
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
RTC_DS3231 rtc;

// -----
// Configuración de las variables de sensores NTC-TTF Series 10kOhm
const int SAMPLE_NUMBER = 10; //Número de muestras por medición
const double BALANCE_RESISTOR = 9990.0; //Valor resistencia de divisor
const double MAX_ADC = 1023.0; //Resolución conversor ADC
const double BETA = 3435.0; //Valor Beta sensor NTC
const double ROOM_TEMP = 298.15; //Temperatura referencia NTC
```



```
const double RESISTOR_ROOM_TEMP = 10000.0; //Valor de referencia de la
resistencia (Ohm)
double currentTemperature = 0;
int thermistorPin = 0;
int i = 0;
int j = 0;

    double rThermistor = 0;           // Holds thermistor resistance value
    double tKelvin      = 0;           // Holds calculated temperature
    double tCelsius     = 0;           // Hold temperature in celsius
    double adcAverage   = 0;           // Holds the average voltage
measurement
    int    adcSamples[SAMPLE_NUMBER]; // Array to hold each voltage
measurement

//Configuración de variables de temperaturas medias mostradas en el LCD
float Cara1;
float T1;
float Cara2;
float T2;
float Cara3;
float T3;
float Cara4;
float T4;

//-----
-----

void setup()
{
    Serial.begin(9600); // Inicio puerto serie
    while ( !Serial ) ;

// Configuración conexión multiplexor PIN-SIG. Modo Analog Input PIN:A0
    mux.signalPin(A0, INPUT, ANALOG);

//Inicio sensores DHT
Serial.println("DHTxx test!");
dht1.begin();
dht2.begin();

//Inicio microSD
Serial.print("Initializing SD card...");
    // make sure that the default chip select pin is set to
    // output, even if you don't use it:
    // pinMode(D8, OUTPUT);
    // see if the card is present and can be initialized:
    if (!SD.begin(chipSelect)) {
        Serial.println("Card failed, or not present");
        // don't do anything more:
        return;
    }
    Serial.println("card initialized.");

//Inicio LCD
lcd.begin(20,4); //Configuración LCD2004
lcd.clear();
lcd.setCursor(5,0);
```

```
    lcd.print("Lambda-Box");
    lcd.setCursor(6,1);
    lcd.print("v. 1.0");
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("Developed by:");
    lcd.setCursor(6,3);
    lcd.print("AMG");
    delay(4000);
    lcd.clear();

//RTC// Comprobación conexión RTC
    if (! rtc.begin()) {
Serial.println("No hay un módulo RTC");
    while (1);
    }
// rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
//   rtc.adjust(DateTime(2018, 2, 5, 8, 43, 0));
}

void loop()

{
    int data;

    for ( int j = 0; j < 16; j++) //Bucle tipo "for" lectura 16 sensores NTC
    desde el ADC A0
    {

// Variables de la función
        double rThermistor = 0;           // Holds thermistor resistance value
        double tKelvin      = 0;           // Holds calculated temperature
        double tCelsius     = 0;           // Hold temperature in celsius
        double adcAverage   = 0;           // Holds the average voltage
    measurement
        int    adcSamples[SAMPLE_NUMBER]; // Array to hold each voltage
    measurement
        float data;

        for (int i = 0; i < SAMPLE_NUMBER; i++)
        {
            adcSamples[i] = mux.read(j); //Lectura del pin y guardar para cada
    entrada j
            delay(10);           // delay 10 milisegundos
        }

        for (int i = 0; i < SAMPLE_NUMBER; i++)
        {
            adcAverage += adcSamples[i]; // agregar todas las muestras
        }
        adcAverage /= SAMPLE_NUMBER;    // valor medio de las muestras

//Función Beta NTC temperatura
    rThermistor = BALANCE_RESISTOR * ( (MAX_ADC / adcAverage) - 1);
    tKelvin = (BETA * ROOM_TEMP) /
        (BETA + (ROOM_TEMP * log(rThermistor / RESISTOR_ROOM_TEMP)));
}
```



```
tCelsius = tKelvin - 273.15; // Conversión Kelvin-Celsius

data = adcAverage*5.11/1024;

Serial.print("Temperatura en el canal nº");
Serial.print(j);
Serial.print(" : ");
Serial.print(mux.read(j));
Serial.print(" ");
Serial.print(adcAverage);
Serial.print(" ");
Serial.print(tCelsius);
Serial.print(" ");
Serial.print(data);
Serial.println("V ");

//PROCESO DE GUARDADO EN LA SD
File dataFile = SD.open("NTC.txt", FILE_WRITE);
// if the file is available, write to it:
if (dataFile) {
  dataFile.print(tCelsius);
  dataFile.print(";");
  dataFile.close();
}
}

Cara1=(mux.read(0)+mux.read(1)+mux.read(2)+mux.read(3))/4;
T1= ((BETA * ROOM_TEMP) / (BETA + (ROOM_TEMP * log((BALANCE_RESISTOR * (
(MAX_ADC / (Cara1)) - 1)) / RESISTOR_ROOM_TEMP))))-273.15;

Cara2=(mux.read(4)+mux.read(5)+mux.read(6)+mux.read(7))/4;
T2= ((BETA * ROOM_TEMP) / (BETA + (ROOM_TEMP * log((BALANCE_RESISTOR * (
(MAX_ADC / (Cara2)) - 1)) / RESISTOR_ROOM_TEMP))))-273.15;

Cara3=(mux.read(8)+mux.read(9)+mux.read(10)+mux.read(11))/4;
T3= ((BETA * ROOM_TEMP) / (BETA + (ROOM_TEMP * log((BALANCE_RESISTOR * (
(MAX_ADC / (Cara3)) - 1)) / RESISTOR_ROOM_TEMP))))-273.15;

Cara4=(mux.read(15)+mux.read(14)+mux.read(13)+mux.read(12))/4;
T4= ((BETA * ROOM_TEMP) / (BETA + (ROOM_TEMP * log((BALANCE_RESISTOR * (
(MAX_ADC / (Cara4)) - 1)) / RESISTOR_ROOM_TEMP))))-273.15;

//Lecturas sensores DHT
float h1 = dht1.readHumidity();
// Read temperature as Celsius
float t1 = dht1.readTemperature();
// Read temperature as Fahrenheit
float f1 = dht1.readTemperature(true);
float h2 = dht2.readHumidity();
// Read temperature as Celsius
float t2 = dht2.readTemperature();
// Read temperature as Fahrenheit
float f2 = dht2.readTemperature(true);
// Check if any reads failed and exit early (to try again).
if (isnan(h1) || isnan(t1) || isnan(f1)) {
  Serial.println("Failed to read from DHT sensor nº1!");
}

// Check if any reads failed and exit early (to try again).
```

```
if (isnan(h2) || isnan(t2) || isnan(f2)) {
    Serial.println("Failed to read from DHT sensor n°2!");
}
Serial.print(h1); Serial.print(";");Serial.print(t1);
Serial.print(";");Serial.print(h2);
Serial.print(";");Serial.print(t2);Serial.print(";"); Serial.print(T1);
Serial.print(";");Serial.print(T2);Serial.print(";");Serial.print(T3);
Serial.print(";");Serial.print(T4); Serial.print(";");
DateTime now = rtc.now();
Serial.print(now.day());
Serial.print('/');
Serial.print(now.month());
Serial.print('/');
Serial.print(now.year());
Serial.print(" ");
Serial.print(now.hour());
Serial.print(':');
Serial.print(now.minute());
Serial.print(':');
Serial.print(now.second());

Serial.println();

//Escritura en la pantalla LCD
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);//Posiciona la primera letra después del segmento 5 en
linea 1
    lcd.print(now.day());lcd.print("/");lcd.print(now.month());lcd.print("/")
);lcd.print(now.year());lcd.print("
");lcd.print(now.hour());lcd.print(":");lcd.print(now.minute());lcd.print(":
");lcd.print(now.second());

lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("C "); lcd.print(h1,0);lcd.print(" "); lcd.print(t1,1);
lcd.print(" F "); lcd.print(h2,0);lcd.print(" "); lcd.print(t2,1);
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("T1 ");
lcd.print(T1);
lcd.setCursor(11,2);
lcd.print("T2 ");
lcd.print(T2);
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("T3 ");
lcd.print(T3);
lcd.setCursor(11,3);
lcd.print("T4 ");
lcd.print(T4);

//PROCESO DE GUARDADO EN LA SD
File dataFile = SD.open("NTC.txt", FILE_WRITE);
// if the file is available, write to it:
if (dataFile) {
    dataFile.print(t1);dataFile.print(";");dataFile.print(h1);dataFile.p
rint(";");dataFile.print(t2);dataFile.print(";");dataFile.print(h2);dataFile
.print(";");dataFile.print(now.day());dataFile.print("/");dataFile.print(now
.month());dataFile.print("/");dataFile.print(now.year());dataFile.print(";")
;dataFile.print(now.hour());dataFile.print(":");dataFile.print(now.minute())
;dataFile.print(":");dataFile.print(now.second());
    dataFile.println(";");
```

```

    dataFile.close();
  }

  delay(57173.579);
}

// -----

```

8.2.2. Equipo monitorización de edificios IoT

```

/* -----
 * Environmental monitoring system based on an Open Source platform and the
 * Internet of the Things.
 * -----
 * Componentes y conexiones:
 * 1)Microcontrolador: Wemos D1 mini
 * 2)Datalogger: Wemos D1 mini SD Shield. Conexión tipo "shield" a través
 * de; CLK:D5 MISO:D6 MOSI:D7 SS/CS:D8
 * 3)Sensor combinado de temperatura y humedad SHT21: Conexión protocolo
 * I2C; SDA:D2 SCL:D1
 * 4)Sensor combinado de presión, temperatura y humedad BME280: Conexión
 * protocolo I2C; SDA:D2 SCL:D1
 * 5)Sensor combinado de presión, temperatura y BMP180: Conexión
 * protocolo I2C; SDA:D2 SCL:D1
 * 6)Sensor de iluminación TSL2561: Conexión protocolo I2C; SDA:D2 SCL:D1
 * 7)Pantalla LCD 1602-I2C.Conexión protocolo I2C; SDA:D2 SCL:D1
 * 8)Sensor combinado de temperatura y humedad DHT22, Conexiones
 * +:+,tvo(pin central): D_ _ _ , -:-
 * 9)Sensor magnético de apertura, Conexiones D_ _ _ , GND
 */

//Configuración conexión Wi-Fi y servidor
#include <ESP8266WiFi.h>
const char* ssid = "SSID";
const char* password = "CONTRASEÑA";

const char* host = "maker.ifttt.com";
const char* makerKey = "KEY IFTT";
const char* makerEventName = "wemos";

//Configuración Datalogger SD formateado a FAT32
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
const int chipSelect = D8;

//Configuración Sensor BME280
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME280.h>
#define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)
Adafruit_BME280 bme; // I2C

```

```
/* //Configuración Sensor DHT22
#include "DHT.h"
#define DHTTYPE DHT22
#define DHTPIN D4
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
*/

//Configuración Sensor SHT21
#include <Wire.h>
#include "SparkFunHTU21D.h"
HTU21D myHumidity;

//Configuración Sensor BMP180
//#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BMP085_U.h>
Adafruit_BMP085_Unified bmp = Adafruit_BMP085_Unified(10085);

//Configuración Sensor MH-Z19
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Ticker.h>
#define CO2_TX D3
#define CO2_RX D4
SoftwareSerial SerialCO2(CO2_RX, CO2_TX); // RX, TX
bool co2ready = true;
Ticker co2ticker;
void tick() {
    co2ready = true;
}

const uint8_t cmd[9] = {0xFF,0x01,0x86,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x79};
int getCO2() {

    uint8_t response[9];
    for (int i=0; i<9; i++) {
        SerialCO2.write(cmd[i]);
    }

    if (SerialCO2.available()) {
        for(int i=0; i < 9; i++) {
            response[i] = SerialCO2.read();
        }
    }

    int responseHigh = (int) response[2];
    int responseLow = (int) response[3];
    int ppm = (responseHigh << 8) + responseLow;

    co2ready = false;

    return ppm;
}

//Configuración Sensor magnético de puerta
const int switchPin = 16;

// Variables
String data1 = "";
float data2;
```



```
float data3;
float data4;
float data5;
float data6;
float data7;
float data8;
float data9;
float data10;
float data11;
float data12;

String dataSet1="";
String dataSet2="";
String dataSet3="";

void setup() {

Serial.begin(115200);
//Wire.begin(0,2);
  delay(10);

//Dar comienzo a los sensores

  /* dht.begin();
  */
  myHumidity.begin();
  SerialCO2.begin(9600);
  co2ticker.attach(2, tick);

  pinMode(switchPin, INPUT);
  digitalWrite(switchPin, HIGH);

  // Conexión Wi-Fi
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(ssid);

  WiFi.begin(ssid, password);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }

  Serial.println("");
  Serial.println("WiFi connected");
  Serial.println("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

Serial.print("Initializing SD card...");
  // make sure that the default chip select pin is set to
  // output, even if you don't use it:
  // pinMode(D8, OUTPUT);
  // see if the card is present and can be initialized:
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Card failed, or not present");
    // don't do anything more:
```



```
    return;
}

Serial.println("card initialized.");

/* Inicio sensor BMP180 */
if(!bmp.begin())
{
    Serial.print("Oops, no BMP180 detected ... Check your wiring or I2C
ADDR!");
    while(1);
}
/* Inicio sensor BME280 */
if (!bme.begin()) {
    Serial.println("Could not find a valid BME280 sensor, check wiring!");
    while (1);
}
}

void loop() {
int buttonState=digitalRead(switchPin);

Serial.println("SensorCO2:");
if (co2ready) {
    Serial.println(getCO2());
}
/*
// comment if use real sensor dht22
float h = dht.readHumidity();
// Read temperature as Celsius (the default)
float t = dht.readTemperature();
// Read temperature as Fahrenheit (isFahrenheit = true)
float f = dht.readTemperature(true);
    if (isnan(h) || isnan(t)) {
        Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
        return;
    }

//Declaración del SHT21
float humd = myHumidity.readHumidity();
float temp = myHumidity.readTemperature();

    /* Get a new sensor eventBMP180 */
    sensors_event_t event;
    bmp.getEvent(&event);
/* First we get the current temperature from the BMP085 */
    float (temperature);
    bmp.getTemperature(&temperature);
/* Then convert the atmospheric pressure, and SLP to altitude */
/* Update this next line with the current SLP for better results */
    float seaLevelPressure = SENSORS_PRESSURE_SEALEVELHPA;

data1 = buttonState;          //sensor magnético puerta
//data2 = t;                  //temperature dht22
// data3 = h;                 //humedad dht22
data4 = bme.readTemperature(); //temperatura BME280
data5 = bme.readHumidity();   //humedad BME280
data6 = bme.readPressure();  //presión BME 280
```



```
data7 = temp; //temperatura SHT21
data8 = humd; //humedad SHT21
data9 = temperature; //humedadBMP180
data10 = event.pressure; //humedadBMP180
data11= bmp.pressureToAltitude(seaLevelPressure,
                               event.pressure);
data12 = getCO2(); //ppm MH-Z19

String dataSet1 = String(data1) + String(";") + String(data4) + String(";")
+ String(data5) + String(";") + double(data6)+ String(";");
String dataSet2 = String(data7) + String(";") + String(data8)+ String(";");
String dataSet3 = String(data9) + String(";") + String(data10) + String(";")
+ String(data11)+ String(";") + String(data12);

Serial.print("connecting to ");
Serial.println(host);

// Use WiFiClient class to create TCP connections
WiFiClient client;
const int httpPort = 80;
if (!client.connect(host, httpPort)) {
    Serial.println("connection failed");
    return;
}

// We now create a URI for the request
String url = "/trigger/";
url += makerEventName;
url += "/with/key/";
url += makerKey;
url += "?value1="; // name of the first recipe data variable
url += dataSet1; // data to send
url += "&value2="; // name of the second recipe data variable
url += dataSet2; // data to send
url += "&value3="; // name of the third recipe data variable
url += dataSet3; // data to send

Serial.print("Requesting URL: ");
Serial.println(url);

// This will send the request to the server
client.print(String("GET ") + url + " HTTP/1.1\r\n" +
            "Host: " + host + "\r\n" +
            "Connection: close\r\n\r\n");
int timeout = millis() + 5000;
while (client.available() == 0) {
    if (timeout - millis() < 0) {
        Serial.println(">>> Client Timeout !");
        client.stop();
        return;
    }
}

// Read all the lines of the reply from server and print them to Serial
while(client.available()){
    String line = client.readStringUntil('\r');
    Serial.println(line);
}
```

```
//PROCESO DE GUARDADO EN LA SD
File dataFile = SD.open("Wemos.txt", FILE_WRITE);
// if the file is available, write to it:
if (dataFile) {
  dataFile.print(dataSet1);
  dataFile.print(dataSet2);
  dataFile.println(dataSet3);
  dataFile.close();
  //   Imprimir dataString por Serial.
  Serial.println("- - - - - Medidas Sensores - - - - -");
  Serial.println("°C");
  Serial.println(dataSet1);
  Serial.println(dataSet2);
  Serial.println(dataSet3);
  Serial.println(getCO2());
  Serial.println("- - - - - Guardando en SD - - - - -");
}
// if the file isn't open, pop up an error:
else {
  Serial.println("error opening Wemos.txt");
}

//PROCESO DE IMPRIMIR EN EL SERIAL
Serial.println();
Serial.println("closing connection\n");

// Wait 2 SEC 10 MINUTE
delay (1*10*1000);
}
```



8.3. Base de datos de precios para las intervenciones de rehabilitación energética

ZFF002 m² Sistema ETICS de aislamiento térmico por el exterior de fachada existente. 62,06€

Rehabilitación energética de fachada, mediante aislamiento térmico por el exterior, con sistema ETICS, compuesto por: panel rígido de poliestireno expandido, según UNE-EN 13163, de superficie lisa y mecanizado lateral recto, de color blanco, de 40 mm de espesor, fijado al soporte con mortero, aplicado manualmente y fijaciones mecánicas con taco de expansión de polipropileno capa de regularización de mortero, aplicado manualmente, armado con malla de fibra de vidrio, antiálcalis, de 5x4 mm de luz de malla, de 0,6 mm de espesor y de 160 g/m² de masa superficial; capa de acabado de mortero acrílico color blanco, sobre imprimación acrílica. El precio incluye la ejecución de remates en los encuentros con paramentos, revestimientos u otros elementos recibidos en su superficie, pero no incluye la preparación de la superficie soporte.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1 Materiales					
mt28mop080d	m	Perfil de arranque de aluminio, de 40 mm de anchura, con goterón, para nivelación y soporte de los paneles aislantes de los sistemas de aislamiento térmico por el exterior sobre la línea de zócalo.	0,170	3,50	0,60
mt28mop085d	m	Perfil de cierre superior, de aluminio, de 40 mm de anchura, para coronación de los paneles aislantes de los sistemas de aislamiento térmico por el exterior.	0,170	14,84	2,52
mt28mop030g	kg	Mortero compuesto de cemento blanco, cal aérea, áridos ligeros, áridos calizos seleccionados, fibras naturales, aditivos y resinas en polvo, impermeable al agua de lluvia, permeable al vapor de agua y con resistencia al envejecimiento, para aplicar con llana, para adherir los paneles aislantes y como capa base, previo amasado con agua.	10,800	1,01	10,91
mt16pep010ab	m ²	Panel rígido de poliestireno expandido, según UNE-EN 13163, de superficie lisa y mecanizado lateral recto, de color blanco, de 40 mm de espesor, con resistencia al envejecimiento y permeable al vapor de agua, resistencia térmica 1,05 m ² K/W, conductividad térmica 0,038 W/(mK), Euroclase E de reacción al fuego.	1,050	6,79	7,13
mt16pep100a	Ud	Taco de expansión de polipropileno de 90 mm de longitud, para fijación de placas aislantes.	8,000	0,20	1,60
mt28mop050a	m ²	Malla de fibra de vidrio, antiálcalis, de 5x4 mm de luz de malla, de 0,6 mm de espesor, de 160 g/m ² de masa superficial y de 1x50 m, para armar morteros.	1,100	1,55	1,71
mt28mop070b	m	Perfil de esquina de PVC con malla, para refuerzo de cantos.	0,300	1,23	0,37
mt28mop075d	m	Perfil de cierre lateral, de aluminio, de 40 mm de anchura.	0,300	4,75	1,43
mt28mop320a	kg	Imprimación acrílica compuesta por resinas acrílicas, pigmentos minerales y aditivos orgánicos e inorgánicos, impermeable al agua de lluvia y permeable al vapor de agua, para aplicar con brocha, rodillo o pistola, para regularizar la absorción e incrementar la adherencia de morteros acrílicos.	0,200	3,69	0,74
mt28mop310ma	kg	Mortero acrílico color blanco, compuesto por resinas acrílicas, pigmentos minerales y aditivos orgánicos e inorgánicos, antimoho y antivandín, permeable al vapor de agua y con resistencia al envejecimiento, a la contaminación urbana y a los rayos UV, para revestimiento de paramentos exteriores.	2,000	3,72	7,44
mt15bes010a	m	Cordón de malla elástica de celos cerradas, de sección circular de 6 mm de diámetro, para el relleno de fondo de junta.	0,170	0,06	0,01
mt15bes035a	Ud	Cartucho de masilla elastómera tixotrópica, monocomponente, a base de polímeros híbridos (MS), de color gris, de 600 ml, de alta adherencia, con elevadas propiedades elásticas, resistencia al envejecimiento y a los rayos UV, dureza Shore A aproximada de 25 y alargamiento en rotura > 600%, según UNE-EN ISO 11600.	0,020	8,24	0,16
				Subtotal materiales:	34,62
2 Mano de obra					
mo054	h	Oficial 1º montador de aislamientos.	0,110	18,13	1,99
mo101	h	Ayudante montador de aislamientos.	0,110	16,43	1,81
mo039	h	Oficial 1º revocador.	0,660	17,54	11,58
mo079	h	Ayudante revocador.	0,660	16,43	10,84
				Subtotal mano de obra:	26,22
3 Costes directos complementarios					
			%	Costes directos complementarios	2,000 60,84 1,22
Coste de mantenimiento decenal: 4,84€ en los primeros 10 años.				Costes directos (1+2+3):	62,06

DLC010 Ud Desmontaje de hoja de carpintería exterior. 9,29€

Desmontaje de hoja de carpintería acristalada de cualquier tipo situada en fachada, de menos de 3 m² de superficie, con medios manuales, sin deteriorar los elementos constructivos a los que está sujeta, y carga manual sobre camión o contenedor.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1 Mano de obra					
mo113	h	Peón ordinario construcción.	0,563	16,16	9,10
				Subtotal mano de obra:	9,10
2 Costes directos complementarios					
			%	Costes directos complementarios	2,000 9,10 0,18
				Costes directos (1+2):	9,28

LCM015 Ud Carpintería exterior de madera. 1.036,43€

Carpintería exterior de madera de pino, para ventana abisagrada, de apertura hacia el interior, de 1400x2000 mm, formada por una hoja oscilobatiente, hoja de 68x78 mm de sección y marco de 68x78 mm, moldura clásica, junquillos, tapajuntas de madera maciza de 70x15 mm y vierteaguas en el perfil inferior, con soporte de aluminio anodizado y revestimiento exterior de madera; con capacidad para recibir un acristalamiento con un espesor mínimo de 21 mm y máximo de 32 mm; coeficiente de transmisión térmica del marco de la sección tipo U_{h,m} = 1,43 W/(m²K), con clasificación a la permeabilidad al aire clase 4, según UNE-EN 12207, clasificación a la estanqueidad al agua clase E1200, según UNE-EN 12208 y clasificación a la resistencia a la carga del viento clase 5, según UNE-EN 12210; acabado mediante sistema de barnizado translúcido; herraje perimetral de cierre y seguridad con nivel de seguridad WK1, según UNE-EN 1627, apertura mediante falleba de palanca, manilla en colores estándar y apertura de microventilación, con premarco.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1 Materiales					
mt22rom100afk	Ud	Premarco de aluminio para carpintería de madera de 1400x2000 mm. Según UNE-EN 14351-1.	1,000	43,33	43,33
mt22rom010fNa	Ud	Ventana de madera de pino, una hoja oscilobatiente, dimensiones 1400x2000 mm, acabado mediante sistema de barnizado translúcido, compuesta de hoja de 68x78 mm y marco de 68x78 mm, moldura clásica, junquillos, tapajuntas de madera maciza de 70x15 mm y vierteaguas en el perfil inferior, con soporte de aluminio anodizado y revestimiento exterior de madera, doble junta perimetral de estanqueidad de goma de caucho termoplástica, con capacidad para recibir un acristalamiento con un espesor mínimo de 21 mm y máximo de 32 mm; coeficiente de transmisión térmica del marco de la sección tipo U _{h,m} = 1,43 W/(m ² K), con clasificación a la permeabilidad al aire clase 4, según UNE-EN 12207, clasificación a la estanqueidad al agua clase E1200, según UNE-EN 12208 y clasificación a la resistencia a la carga del viento clase 5, según UNE-EN 12210; herraje perimetral de cierre y seguridad con nivel de seguridad WK1, según UNE-EN 1627, apertura mediante falleba de palanca, manilla en colores estándar y apertura de microventilación. Según UNE-EN 14351-1.	1,000	853,40	853,40
mt23xpm015a	Ud	Tornillo de acero galvanizado de cabeza cilíndrica, de 6 mm de diámetro y 15 cm de longitud.	12,000	0,26	3,12
mt12blw110a	Ud	Aerosol de 750 cm ³ de espuma de poliuretano, de 22,5 kg/m ³ de densidad, 140% de expansión, 18 N/cm ² de resistencia a tracción y 20 N/cm ² de resistencia a flexión, conductividad térmica 0,04 W/(mK), estable de -40°C a 100°C; para aplicar con pistola; según UNE-EN 13165.	0,100	7,20	0,72
mt22www020	m	Cinta autoadhesiva, impermeable al vapor de agua, de 70 mm de anchura, compuesta por una película de polietileno laminado sobre una banda de fieltro, suministrada en rollos de 25 m de longitud.	6,940	0,93	6,45
mt22www010b	Ud	Cartucho de 290 ml de sellador adhesivo monocomponente, neutro, superelástico, a base de polímero MS, con resistencia a la intemperie y a los rayos UV, elongación hasta rotura 750%, color gris.	0,100	5,29	0,53
				Subtotal materiales:	907,55
2 Mano de obra					
mo017	h	Oficial 1º carpintero.	3,154	17,86	56,33
mo058	h	Ayudante carpintero.	3,154	18,56	58,23
				Subtotal mano de obra:	108,56
3 Costes directos complementarios					
			%	Costes directos complementarios	2,000 1,016,11 20,32
Coste de mantenimiento decenal: 259,11€ en los primeros 10 años.				Costes directos (1+2+3):	1.036,43

ZBV010 m² Sustitución de vidrios de la carpintería exterior por acristalamiento con cámara "CONTROL GLASS ACÚSTICO Y SOLAR". 46,19€

Rehabilitación energética de cerramientos de huecos de fachada, mediante el desmontaje de acristalamiento, sin deteriorar la carpintería a la que se sujeta, con medios manuales y carga manual del material desmontado sobre camión o contenedor, y sustitución por doble acristalamiento Aislaglas "CONTROL GLASS ACÚSTICO Y SOLAR", 4/16/4, de 24 mm de espesor total, con calzos y sellado continuo.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1 Materiales					
mt21veu011aaEaa	m ²	Doble acristalamiento Aislaglas "CONTROL GLASS ACÚSTICO Y SOLAR", conjunto formado por vidrio exterior Float incoloro de 4 mm, cámara de aire deshidratada con perfil separador de aluminio y doble sellado perimetral, de 16 mm, y vidrio interior Float incoloro de 4 mm de espesor; 24 mm de espesor total.	1,006	24,10	24,24
mt21sik010	Ud	Cartucho de 310 ml de silicona sintética incolora Elastosil WS-305-N "SIKA" (rendimiento aproximado de 12 m por cartucho).	0,580	2,47	1,43
mt21vva021	Ud	Material auxiliar para la colocación de vidrios.	1,000	1,26	1,26
Subtotal materiales:					26,93
2 Mano de obra					
mo055	h	Oficial 1º cristalero.	0,500	18,94	9,47
mo110	h	Ayudante cristalero.	0,500	17,75	8,88
Subtotal mano de obra:					18,35
3 Costes directos complementarios					
% Costes directos complementarios			2,000	45,28	0,91
Coste de mantenimiento decenal: 9,70€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3): 46,19		

ZBV030 m² Sustitución de vidrios de la carpintería exterior por acristalamiento con cámara "SAINT GOBAIN". 74,64€

Rehabilitación energética de cerramientos de huecos de fachada, mediante el desmontaje de acristalamiento, sin deteriorar la carpintería a la que se sujeta, con medios manuales y carga manual del material desmontado sobre camión o contenedor, y sustitución por doble acristalamiento SGG CLIMALIT PLUS PLANITHERM XN F2 4/16 aire/4 "SAINT GOBAIN", de 24 mm de espesor total, con calzos y sellado continuo.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1 Materiales					
mt21dsg011da	m ²	Doble acristalamiento SGG CLIMALIT PLUS "SAINT GOBAIN", conjunto formado por vidrio exterior PLANITHERM XN de 4 mm, con capa de baja emisividad térmica incorporada en la cara interior, cámara de aire deshidratada con perfil separador de aluminio y doble sellado perimetral, de 16 mm, y vidrio interior PLANICLEAR de 4 mm de espesor; 24 mm de espesor total.	1,006	51,83	52,14
mt21sik010	Ud	Cartucho de 310 ml de silicona sintética incolora Elastosil WS-305-N "SIKA" (rendimiento aproximado de 12 m por cartucho).	0,580	2,47	1,43
mt21vva021	Ud	Material auxiliar para la colocación de vidrios.	1,000	1,26	1,26
Subtotal materiales:					54,83
2 Mano de obra					
mo055	h	Oficial 1º cristalero.	0,500	18,94	9,47
mo110	h	Ayudante cristalero.	0,500	17,75	8,88
Subtotal mano de obra:					18,35
3 Costes directos complementarios					
% Costes directos complementarios			2,000	73,18	1,46
Coste de mantenimiento decenal: 15,67€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3): 74,64		

LVE010 m² Triple acristalamiento "SAINT GOBAIN". 107,91€

Triple acristalamiento SGG CLIMALIT PLUS PLANITHERM XN F2 PLANITHERM XN F5 4/(16 argón 90%)/4/(16 argón 90%)/4 "SAINT GOBAIN", fijado sobre carpintería con calzos y sellado continuo por el exterior y perfil continuo por el interior, para hojas de vidrio de superficie menor de 2 m².

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1 Materiales					
mt21vsg011aa	m ²	Triple acristalamiento SGG CLIMALIT PLUS "SAINT GOBAIN", conjunto formado por vidrio exterior PLANITHERM XN de 4 mm, con capa de baja emisividad térmica incorporada en la cara interior, dos cámaras deshidratadas rellenas de gas argón con perfil separador de aluminio y doble sellado perimetral, de 16 mm de espesor cada una, vidrio intermedio PLANICLEAR incoloro de 4 mm y vidrio interior PLANITHERM XN de 4 mm, con capa de baja emisividad térmica incorporada en la cara exterior, para hojas de vidrio de superficie menor de 2 m ² ; 44 mm de espesor total.	1,006	87,48	88,00
mt21sik010	Ud	Cartucho de 310 ml de silicona sintética incolora Elastosil WS-305-N "SIKA" (rendimiento aproximado de 12 m por cartucho).	0,290	2,47	0,72
mt21vva025	m	Perfil continuo de neopreno para la colocación del vidrio.	1,667	0,90	1,50
mt21vva021	Ud	Material auxiliar para la colocación de vidrios.	1,000	1,26	1,26
Subtotal materiales:					91,48
2 Mano de obra					
mo055	h	Oficial 1º cristalero.	0,390	18,94	7,39
mo110	h	Ayudante cristalero.	0,390	17,75	6,92
Subtotal mano de obra:					14,31
3 Costes directos complementarios					
% Costes directos complementarios			2,000	105,79	2,12
Coste de mantenimiento decenal: 22,66€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3): 107,91		

LVE010 m² Triple acristalamiento "SAINT GOBAIN". 106,19€

Triple acristalamiento SGG CLIMALIT PLUS PLANITHERM XN F2 PLANITHERM XN F5 4/(16 argón 90%)/4/(16 argón 90%)/4 "SAINT GOBAIN", fijado sobre carpintería con calzos y sellado continuo por el exterior y perfil continuo por el interior, para hojas de vidrio de superficie menor de 2 m².

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1 Materiales					
mt21vsg011aa	m ²	Triple acristalamiento SGG CLIMALIT PLUS "SAINT GOBAIN", conjunto formado por vidrio exterior PLANITHERM XN de 4 mm, con capa de baja emisividad térmica incorporada en la cara interior, dos cámaras deshidratadas rellenas de gas argón con perfil separador de aluminio y doble sellado perimetral, de 16 mm de espesor cada una, vidrio intermedio PLANICLEAR incoloro de 4 mm y vidrio interior PLANITHERM XN de 4 mm, con capa de baja emisividad térmica incorporada en la cara exterior, para hojas de vidrio de superficie menor de 2 m ² ; 44 mm de espesor total.	1,006	87,48	88,00
mt21sik010	Ud	Cartucho de 310 ml de silicona sintética incolora Elastosil WS-305-N "SIKA" (rendimiento aproximado de 12 m por cartucho).	0,290	2,47	0,72
mt21vva025	m	Perfil continuo de neopreno para la colocación del vidrio.	1,667	0,90	1,50
mt21vva021	Ud	Material auxiliar para la colocación de vidrios.	1,000	1,26	1,26
Subtotal materiales:					91,48
2 Mano de obra					
mo055	h	Oficial 1º cristalero.	0,344	18,94	6,52
mo110	h	Ayudante cristalero.	0,344	17,75	6,11
Subtotal mano de obra:					12,63
3 Costes directos complementarios					
% Costes directos complementarios			2,000	104,11	2,08
Coste de mantenimiento decenal: 22,30€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3): 106,19		

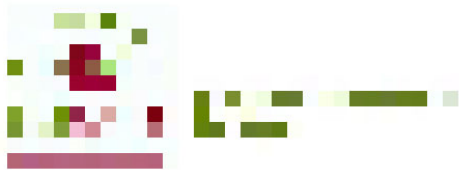


ZBM010 m Sistema de estanqueidad y aislamiento térmico entre carpintería y obra.

9,40€

Rehabilitación energética de edificio mediante la incorporación de sistema de estanqueidad y aislamiento térmico entre carpintería y obra, compuesto por relleno de la junta perimetral entre la carpintería del cerramiento y la obra, mediante aplicación de espuma adhesiva autoexpansiva elástica de poliuretano monocomponeente; sellado exterior de junta de 10 mm de anchura y 5 mm de profundidad, con sellador monocomponeente neutro superelástico a base de polímero MS, con resistencia a la intemperie y a los rayos UV, color blanco, y sellado interior de la junta de 5 mm de anchura y 5 mm de profundidad, con silicona neutra oxímica, de elasticidad permanente y curado rápido, color blanco.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
1 Materiales					
mt22www040	Ud	Aerosol de 750 ml de espuma adhesiva autoexpansiva, elástica, de poliuretano monocomponeente, de 25 kg/m ³ de densidad, conductividad térmica 0,0345 W/(mK), 135% de expansión, elongación hasta rotura 45% y 7 N/cm ² de resistencia a tracción, estable de -40°C a 90°C; para aplicar con pistola; según UNE-EN 13165.	0,130	8,37	1,09
mt22www070a	l	Impresión transparente a base de poliuretano, para selladores acrílicos sobre superficies porosas.	0,002	23,20	0,05
mt22www010a	Ud	Cartucho de 290 ml de sellador adhesivo monocomponeente, neutro, superelástico, a base de polímero MS, con resistencia a la intemperie y a los rayos UV, elongación hasta rotura 750%, color blanco.	0,170	5,29	0,90
mt22www050a	Ud	Cartucho de 300 ml de silicona neutra oxímica, de elasticidad permanente y curado rápido, color blanco, rango de temperatura de trabajo de -60 a 150°C, con resistencia a los rayos UV, dureza Shore A aproximada de 22, según UNE-EN ISO 868 y elongación a rotura >= 800%, según UNE-EN ISO 8339.	0,080	4,73	0,38
				Subtotal materiales:	2,42
2 Mano de obra					
mo020	h	Oficial 1ª construcción.	0,229	17,54	4,02
mo113	h	Peón ordinario construcción.	0,172	16,16	2,78
				Subtotal mano de obra:	6,80
3 Costes directos complementarios					
	%	Costes directos complementarios	2,000	9,22	0,18
Coste de mantenimiento decenal: 5,01€ en los primeros 10 años.			Costes directos (1+2+3):		9,40



Documento **Cliente**

PRESUPUESTO: A/16/00001119

ALEXANDER MARTIN GARIN

Fecha 07/01/2016
Cliente 0000279
Referencia
Página 1

20001 DONOSTIA-SAN SEBASTIAN
GUIPÚZCOA
C.I.F.:
E-mail: alexandermartingarín@gmail.com
Tífn.: Fax:

Estimados Señores:
A continuación presentamos nuestra mejor oferta para la adquisición por su parte, de los siguientes productos y/o servicios:

Código	Descripción	Cantidad	Precio	Iva	€ Importe
HOMA0040	M2. CELULOSA FLEX PANEL 1200 X 625 X 40	120,00	10,60	21% - 15%	1.081,20
HOMA0060	M2 CELULOSA FLEX PANEL 1200 X 625 X 60	120,00	16,11	21% - 15%	1.643,22
GUTEX02010	M2. GUTEX THERMORFLEX DE 40 MM. 57 X 122 CM	124,52	6,73	21% - 15%	712,32
GUTEX02011	M2. GUTEX THERMORFLEX DE 60 MM. 57 X 122 CM	120,36	9,91	21% - 15%	1.013,85
PROCLIO1011	M2. PROCLIMA INTELLO 20 X 1,50 M	120,00	3,05	21% - 15%	311,10
PROCLIO1013	M2. PROCLIMA INTELLO PLUS 20 X 1,50	120,00	3,22	21% - 15%	328,44
PROCLIO5013	UD. TESCON VANA 6 CM X 30 M	1,00	26,28	21% - 15%	22,34
PROCLIO5007	UD. ROLLO DUPLEX E:2,5 L:20	1,00	7,19	21% - 15%	6,11
PROCLIO5010	UD. ROLLO TESCON PROFIL E: 6 L:30	1,00	33,70	21% - 15%	28,65
PROCLIO6170	UD. CONTEGA IQ FABRICA (12941)	1,00	63,01	21% - 15%	53,56
PROCLIO5051	UD. CONTEGA SOLIDO SL 8 CM	1,00	41,78	21% - 15%	35,51
PROCLIO6203	UD. ROLLO CONTEGA FINDEN EXO 10/3-6-ART 15549	1,00	4,54	21% - 15%	3,86
PROCLIO4012	UD. ORCON CLASSIC 310	1,00	7,64	21% - 15%	6,49

CONDICIONES DE ENTREGA	
FORMA DE PAGO	CONTADO
ENTIDAD	
VALIDEZ OFERTA	07/01/2016

Base Imp.	%Iva	Cuota Iva	€ TOTAL OFERTA

Aceptación de presupuesto

Los plazos de entrega, están calculados en función de los compromisos de trabajo actuales de ██████████ por lo que les rogamos que, de estar interesados en este presupuesto, nos lo comuniquen a la mayor brevedad posible con el fin de ajustarnos al máximo a las condiciones de tiempo estimadas. La validez de esta oferta es de 30 días. La aceptación de este Presupuesto pueden hacerlo por fax o bien por correo electrónico.

FDO.:

ACEPTADO

FIRMA Y SELLO





Environmental monitoring system based on an Open Source Platform and the Internet of Things for a building energy retrofit

A. Martín-Garín^{a, *}, J.A. Millán-García^a, A. Bairi^b, J. Millán-Medel^c, J.M. Sala-Lizarraga^d

^a ENEDI Research Group, Department of Thermal Engineering, Faculty of Engineering of Gipuzkoa, University of the Basque Country UPV/EHU, Plaza Europa 1, 20018 Donostia-San Sebastián, Spain

^b University of Paris, Laboratoire Thermique Interfaces Environnement, LTIE-GTE EA 4415, 50, rue de Sèvres, F-92410 Ville d'Avray, France

^c Tecnun, Faculty of Engineering of Donostia, University of Navarra, Paseo de Manuel Lardizábal 13, 20018 Donostia-San Sebastián, Spain

^d ENEDI Research Group, Department of Thermal Engineering, Faculty of Engineering of Bilbao, University of the Basque Country UPV/EHU, Alda Urquijo S/N, 48013 Bilbao, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Building and environmental monitoring
Development freedom
Indoor air quality
Internet of Things
Open Source Platform

ABSTRACT

This paper deals with the design and development of a low cost building environmental monitoring system, and it is based on Open Source Platforms and on the Internet of Things. To achieve this aim, a wireless microcontroller with attached sensors has been used to collect the environmental data. The information obtained from the sensors is collected and stored in a flash memory card, and simultaneously is sent via WiFi to the cloud. This data is stored in an online spreadsheet, which permits us to access the information in real time.

On the other hand, a comparative analysis of the results obtained from sensors has been carried out, thanks to which several guidance guidelines have been developed for the selection of the most appropriate environmental sensor for each project. Finally, an additional evaluation of the device has been carried out through the analysis of its energy performance and providing information related to the data storage and its cost of development.

The current research shows a clear ability to develop monitoring systems for the building sector, which can also be extended to multiple applications of Smart Environments. The development of projects through these platforms will allow future research to tackle the existing barriers in monitoring campaigns.

1. Introduction

Nowadays, cities are undergoing radical operational changes. These new models known as Smart Cities aim to improve the quality of life of citizens using gathered data about the surrounding environment through the use of Information and Communications Technologies (ICT) [1]. This new situation allows citizens to be able to interact more efficiently with the new Smart elements that make up the cities, such as infrastructures, constructions and buildings (SICB). Due to its impact, this phenomenon arouses great interest both in the academic and industry areas [2].

In addition, the Internet of Things (IoT) is one of the great technologies that is supporting the Smart Cities and their SICB to achieve these objectives [3]. The optimization of traffic [4] and parking management [5], the development of water leakage detection [6] and management systems [7], the energy performance improvement of build-

ings [8] or appliances like a refrigerator [9] are examples of the application of this technology to different scales of the buildings and services of the cities.

Within the SICB context, buildings are one of the main consumers of energy in Europe. This sector currently accounts for 40% of total final energy consumption and therefore, its improvement can contribute to meeting the energy objectives [10]. In 2009, 68% of the used final energy in buildings has been consumed in European households. This energy consumption in homes is due to heating, cooling, hot water, cooking and appliances, however the predominant use is space heating, responsible for 70% of consumption in dwellings [11].

One-third of all residential buildings were built before 1960, and almost 84% are at least 20 years old [12]. Taking into consideration that the age of the buildings is closely related to their energy consumption, the refurbishment of the building envelope to the new standards entails a great potential for energy and CO₂ emissions savings. The annual growth rate in the residential sector is around 1% while most countries

* Corresponding author.

Email address: alexander.martin@ehu.eus (A. Martín-Garín)

are experiencing a decrease in the rate of new building construction in the recent years, which reflects the impact of the current financial crisis on the construction sector [11]. New buildings can be built following the new high efficiency standards, however, the objective is to improve the conditions of the existing buildings. These represent the great majority of the building stock in which low energy efficient buildings predominate and therefore require an energy optimization.

In energy refurbishment, one of the aspects that is contemplated is the monitoring of buildings as a tool to optimize this type of interventions. The main reason, among others, is that this allows a quantitative comparison of the degree of the improvements obtained to be carried out after the refurbishment process, paying special attention to characteristic parameters such as energy consumption, interior comfort, air quality or characteristics of the thermal envelope. However, sometimes these monitoring campaigns cannot be carried out due to their excessive cost and because they require resources that exceed the capacity of most projects [13].

On the other hand, one of the research lines that is taking on great relevance is related to the trends of application of open software and hardware. One of these branches is the well-known Open Source Platforms (OSP), which allows the development of self-developed projects, thanks to the fact that it shares knowledge with the community [14]. In addition, one of the applications in which this technology is being used is in environmental monitoring [15]. This enables studies related to the environmental behaviour of the buildings to be performed in an easier way, which in turn facilitates the decision making process.

Previous experiences of the research group in building energy monitoring [13,16,17] and the review of the state of the art [18–24] have allowed certain gaps, issues and new alternatives to be detected. Monitoring devices with limited number of measurement variables, high acquisition costs, low data storage capacity, a need to use different platforms or equipment's to perform the measurements or not being able to consult the recorded data in real time are usually some of the most common issues which are presented in the monitoring campaigns. These reasons have motivated the development of the following research with the objective to solve the existing challenges in the monitoring sector. For it and for the development of an innovative system within the Smart Cities area, the combination of above mentioned emerging tools and technologies have become essential.

The goal of this paper is to build a self-developed monitoring prototype to track the environmental conditions of the buildings and to also make it applicable to other Smart Environments. It has been based on the OSP and employs the IoT to instantaneously send the data to the cloud. This paper focuses on the design and development of the monitoring equipment and provides the suitability of its implementation in a real case study. This will test the chance of its application as a tool for monitoring in larger scale projects where price, ease of deployment, connectivity and transmission of data and the freedom in its development play a vital role.

2. Background

2.1. Building monitoring

Building monitoring is a very useful tool in multiple areas. At a domestic level, the home energy monitoring and automation can motivate the consumers to use the energy more efficiently and wisely by having the overview of their appliances [25]. However, the research is valuable for diverse purposes. The development of thermal characterization methods [17] or the use of such information as feed data for the calibration and validation of the energy simulations of buildings [26] are clear examples of other forms of monitoring use.

In the domestic sector, one of the objectives of monitoring is the reduction of energy consumption by providing information on energy

matters to the user. This information, according to Darby [27], is based on three principles: the knowledge of energy use, the change of user behaviour and the understanding of the changes that have occurred in energy consumption after the interpretation of available feedback. The same author states that in the vast majority of cases, the energy consumption of homes is invisible to the user. This is why he performed an analysis of the influence of different types of feedback as learning tools on tenants' energy behaviour. It showed how the direct feedback achieved through the "providing real time meter readings" managed to achieve 5–15% energy savings compared to 0–10% obtained through indirect feedback (billing).

As Shaikh's [28] research indicates, "It is generally perceivable that energy unaware activities can also add one-third to the building's energy performance." In addition, a potential energy savings of 30% can be achieved through the use of smart automation in buildings.

In short, there is no doubt about the advantages of measurement and automation, as well as the great interest of its implementation for the energy optimization of buildings by all stakeholders (tenants, building technicians, energy managers, researchers, policy developers, etc.). However, the still unreached challenges (interoperability, security, cost, sensors development potential and lack of ICT infrastructure) [29] hinder the objectives of their effective application on a large scale [10,30,31]. That is why today we need more open tools that have mass deployment capabilities.

2.2. Internet of things

The Internet of Things (IoT) has been called the next Industrial Revolution or the next evolution of the Internet. It will impact how businesses, governments and consumers interact with the physical world through Internet-connected sensors, cameras, handheld devices, smartphones and other smart IoT devices. According to Cisco [32], the IoT is simply the point in time when more "things or objects" were connected to the Internet than people. The company points out that this point occurred between 2008 and 2009 with the exponential growth of the use of smartphones and tablets.

The main strength of the IoT idea is the high impact it will have on various aspects of everyday life and the behaviour of potential users [33]. The IoT is a technological paradigm aimed at increasing the connectivity of everyday devices. That is why in the coming years the growth and use of this type of technology will increase exponentially due to its application in multiple fields. Such is the predicted growth that, the currently estimated 6.4 billion IoT devices in use will rise to a total of 20.8 [34]–50 [32] billion by 2020.

IoT revolves around an increase in machine-to-machine (M2M) communication and wireless encompasses, integrated sensors and actuators that help users in monitoring and controlling devices remotely and efficiently [35]. In this new paradigm, smart devices will collect data, transmit information or context to each other, and process information collaboratively using cloud computing and similar technologies. Finally, either human beings will be prompted to take action, or the machines themselves will act automatically. This paradigm shift creates numerous challenges and opportunities for engineering [36].

Given the great importance that the monitoring sector is taking on, and given the growth trend of the IoT for the next years, several companies are continuously advancing in the sector [37]. In addition, the list of Internet servers [38–41] that can be used as tools for storing, visualizing and sharing data is being expanded, thus enabling it to take a further step in monitoring methodologies.

In short, the IoT is a necessary tool for many work fields and research. At the same time, the IoT combined with the OSP transforms into a powerful technology that allows the user both to develop systems and to understand and make decisions in real time about the envi-

ronment that surrounds him. This aspect, as we have pointed out, has become paramount in recent times.

3. Study

Atzori et al. [33] notes that any serious contribution to the advancement of the Internet of Things, should necessarily be the result of synergistic activities conducted in different fields of knowledge. In addition, as OSPs are a research tool [18] and, besides allowing complete freedom in the development of projects, it has been considered appropriate to use in combination with the IoT for the development buildings monitoring projects.

This section provides an introduction to the research carried out, the results and the conclusions which are pointed in the following sections. The first aspect to be shown in this section will consist of the methodology carried out throughout the research. After which the process that has been followed for the development of the monitoring equipment will be introduced. Finally, the studied case will be presented where the monitoring test has been carried out with the equipment to verify its correct operation under real conditions.

3.1. Methodology

The methodology and steps carried out in this research is summarized by the flowchart of Fig. 1. It is made up of three distinct stages.

The initial stage begins by clarifying which are the objectives and challenges to be met in monitoring. This step is very important since it will be the one that will determine the way forward along the investigation. Following this, it is necessary to carry out a review of the state

of the art existing techniques to promote a quality research and nourish itself with the existing knowledge on the subject.

The next stage comprises all the necessary steps to carry out the physical monitoring, from the design and assembly of the proposed equipment, to the collection of equipment in the building. This phase comprises of online real time monitoring of the recorded parameters to see their evolution and check its correct operation.

In the final stage, once the data has been collected from the device, we proceed to corroborate the agreement of the data stored in the physical memory of the equipment with those recorded in the cloud. The results are then analyzed with the objective of obtaining the relationships between the different evaluated parameters, detecting the existence of patterns and statistically evaluating the recorded values.

Once the results are analyzed, the conclusions of the study are obtained and complementary or improvement developments are proposed for future monitoring, thus concluding the research carried out.

3.2. Development of the prototype

Currently there is a great diversity of measurement systems and sensors in the market with different degrees of sophistication and functionality. The choice of the best solution is a challenge that depends on multiple factors and on the monitoring needs [29]. In the case at hand, the device to be developed should meet the following requirements:

- Be a non-invasive system.
- Be a low cost development device.
- Have freedom in the development of equipment to meet specific needs.
- Have wireless data transmission.
- Have data collection security in case of loss of the wireless connection and/or loss of power supply.
- Have a high capacity of data storage.
- Provide the possibility to consult the recorded data in real time both in situ and online.

Taking into account the aforementioned needs, a device that met those requirements was developed. Mainly, the system consists of a microcontroller that has two functions.

On the one hand it will manage the inputs that come from the different sensors that communicate with the microcontroller through different protocols. The second function is to allow the collected information to be consulted and analyzed. To this end, three types of differentiated outputs have been proposed.

Firstly, with the purpose of providing direct information to the user, an OLED screen has been disposed to allow the consult to the collected in situ information, showing the values registered in real time. Secondly, the prototype has been equipped with a storage system through a microSD card that allows secure storage of sensory information. One of the advantages of using this method is that we provide a high capacity storage system and besides, we make the data easily accessible for the user and technicians, as it is a common and widely used standard. Finally, to access the information from anywhere, IoT platforms have been used by transmitting the information via WiFi from the microcontroller via router to the Google Drive Spreadsheets storage system. For this purpose, a series of steps are carried out. The first one consists of transforming the recorded variables with the microcontroller and the sensors into text strings using the programming code and to use a variable separator element to later facilitate the data processing, in this case the element “;” was used. Subsequently, through the programming code, a web request is generated through a GET that, in addition to containing the previously generated text strings, adds the necessary data to be able to transmit the information (host, identification code and security code). Finally, the text strings they arrive at the Spread-

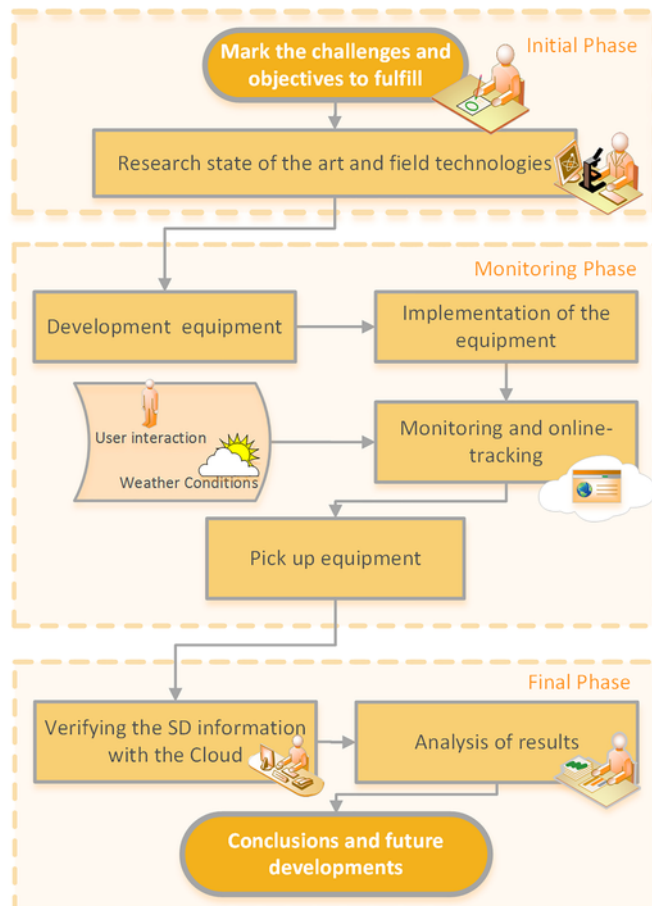


Fig. 1. Flowchart of the employed methodology during the research.

sheet, where they are transformed back into numerical values and the variables are ordered in columns through the previous semicolon separator. The reason for the use of Spreadsheets is because it is a widely used, freely accessible platform that allows the authorized users to collect, display and share in real time the registered information. Fig. 2 shows an example of the data recorded on the Google platform in real time with the developed prototype.

We would like to point out that for the selection of the sensors, in addition to the accuracy of the data acquisition, we considered the type of used communication protocol and the number of required connections. That is, in general terms, each sensor unit needs a connection to the board, so there is a limitation on the number of sensors that can be used depending on the number of available board inputs. Nevertheless, thanks to the incorporation of digital functionalities of the OSPs, the trend has been to employ sensors that used the “Inter Integrated Circuit” (I2C) communication protocol. One particular feature offered by this protocol is its possibility of transmitting information between the microcontroller and the sensors through only two connection wires. The first pin is used for Serial Data (SDA) in charge of data transmission, and the second one is the Serial Clock (SCL) in charge of indicating the reading time of the data. Thus, this protocol allows a connection in parallel through the same serial bus of up to a maximum of 128 devices, since each component has a unique address of 2^7 bits. This has made it possible to reduce the number of pins needed to connect the sensors to the microcontroller, thus avoiding the use of multiplexed systems or several interconnected microcontrollers.

In relation to the selection of the board, nowadays, those based on Raspberry [42] and those based on Arduino [43] are the two most employed platforms. Although the former has a large capacity and power because it consists of a small single-board computer, at the same time an operating system is required for its operation and therefore the complexity of the projects increase. On the other hand, the Arduino platform allows projects to be developed with great simplicity because it offers ease in the control of the inputs and outputs and also has the advantage over the Raspberry in applications which demand a very high degree of reliability due to its operation being governed by a microcontroller [44]. Due to the nature of the project, which only requires the control of data input and output, it will be based on the Arduino platform. Finally, the board must be able to develop IoT projects, so it will be necessary that the board offers integrated WiFi connectivity, thus avoiding the use of shields or dongles and also simplifying the required hardware.

The specific characteristics of the developed data-acquisition system are shown below:

- **Electronic board:** It is based on the powerful ESP-8266 WiFi microcontroller [45]. It is a 32 bit processor that runs between 80 and 160 Mhz clock speed with 4 Mb of flash memory. The board has 11 digital I/O pins, 1 analog input pin and its dimensions are 34.2×26.6 mm. It can be connected to the PC via micro USB or over the air (OTA) method, allowing very useful wireless programming in occasions where it is difficult to return to the location of the board or the board is lost. In addition to these features this board is characterized by its low acquisition cost and the possibility of using the developed code in Arduino boards since they employ the same IDE. These last features, and the fact of being a microcontroller with integrated WiFi, were the reasons this board was employed.
- **MicroSD shield:** It is very important to use MicroSD card readers when it is anticipated that the amount of information to be stored will be high. The communication method used with the microcontroller is through the SD.h library and the Serial Peripheral Interface (SPI) protocol. In the model, a microSD memory card with capacity of storage of 8 Gb has been used.
- **Environment sensors:** Due to the great diversity of existing models and the interest of the research group, it has been considered convenient to select several models to carry out a performance test. The objective is to analyze the obtained results with each of them and depending on their quality, to be able to recommend which is the optimal sensor depending on the type of use.
 - **DHT22 [46]:** this is a basic and low-cost digital sensor that is based on the use of a thermistor for temperature measurement and a capacitive sensor for relative humidity. It allows temperature measurement ranges between -40 and 80 °C and between 0% and 100% for the case of relative humidity. It offers typical accuracy of ± 0.5 °C in temperature and $\pm 2\%$ in relative humidity respectively and a resolution of 0.1 °C and 0.1%. This sensor uses the one-wire communication protocol for sending data and must be supplied with a voltage between 3.3 and 5.5 V. The minimum time required between each reading is 2 s, an aspect that can condition its application in certain types of projects. The performance of this sensor was evaluated because it is one of the most employed and known temperature and humidity sensors in OSP projects. It was also chosen because the technical characteristics it offers are similar to those offered by the usual data acquisition sys-

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		DHT22 (°C, %); Switch Sensor (I/O), MH-Z19 (ppm)	SHT21 (°C, %)	BME 280 (°C, %, Pa) BMP180 (°C, hPa)						
2	July 1, 2016 at 08:00PM	25.00;60.10;0.676;0.0;	24.04;63.33;	21.55;64.65;101540.55;23.60;1015.41;						
3	July 1, 2016 at 08:10PM	24.80;61.30;0.667;0.0;	24.00;63.47;	21.63;64.65;101548.13;23.50;1015.53;						
4	July 1, 2016 at 08:20PM	24.80;61.20;0.666;0.0;	23.97;63.73;	21.58;65.09;101551.22;23.50;1015.55;						
5	July 1, 2016 at 08:30PM	24.70;61.60;0.656;0.0;	23.94;63.82;	21.66;64.90;101565.80;23.50;1015.72;						
6	July 1, 2016 at 08:40PM	24.70;61.90;0.653;0.0;	23.91;64.14;	21.69;65.52;101564.86;23.40;1015.74;						
7	July 1, 2016 at 08:50PM	24.70;61.90;0.652;0.0;	23.89;64.32;	21.36;66.49;101572.27;23.40;1015.82;						
8	July 1, 2016 at 09:00PM	24.70;62.30;0.649;0.0;	23.89;64.29;	21.17;67.42;101581.00;23.40;1015.81;						
9	July 1, 2016 at 09:10PM	24.70;62.70;0.634;0.0;	23.87;64.32;	20.78;72.90;101584.16;23.40;1015.87;						
10	July 1, 2016 at 09:20PM	24.60;62.70;0.623;0.0;	23.86;64.55;	20.97;71.33;101593.39;23.40;1015.94;						
11	July 1, 2016 at 09:30PM	24.60;62.50;0.623;0.0;	23.85;64.58;	20.93;70.37;101593.33;23.30;1015.93;						
12	July 1, 2016 at 09:40PM	24.60;62.80;0.617;0.0;	23.84;64.90;	20.77;71.07;101595.72;23.40;1015.97;						
13	July 1, 2016 at 09:50PM	24.60;63.00;0.607;0.0;	23.83;64.79;	20.73;70.57;101601.47;23.30;1015.99;						
14	July 1, 2016 at 10:00PM	24.60;63.30;0.602;0.0;	23.83;64.96;	20.69;70.23;101624.36;23.30;1016.21;						
15	July 1, 2016 at 10:10PM	24.60;63.30;0.599;0.0;	23.83;65.14;	20.75;69.79;101637.48;23.30;1016.38;						
16	July 1, 2016 at 10:20PM	24.60;63.40;0.593;0.0;	23.83;65.19;	20.78;69.97;101649.14;23.30;1016.49;						
17	July 1, 2016 at 10:30PM	24.60;63.20;0.592;0.0;	23.82;65.31;	20.73;71.18;101667.00;23.30;1016.69;						
18	July 1, 2016 at 10:40PM	24.60;63.50;0.621;0.0;	23.83;65.37;	20.75;72.09;101674.44;23.30;1016.77;						
19	July 1, 2016 at 10:50PM	24.60;63.60;0.668;0.0;	23.84;65.37;	20.77;71.77;101679.30;23.30;1016.79;						
20	July 1, 2016 at 11:00PM	24.60;64.10;0.705;0.0;	23.86;65.43;	20.86;70.03;101678.89;23.40;1016.87;						

Fig. 2. Extract of simultaneously collected data by the cloud service of Google Spreadsheet.

tems. So, this sensor can be a good piece of equipment for environmental monitoring devices.

- SHT21 [47]: This combined sensor uses a capacitive sensor to measure humidity and a band gap sensor for temperature. The measurement range is from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 0% to 100% , with a typical accuracy of $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $\pm 2\%$ and a resolution of $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 0.04% . The sensor needs to supply voltage from 2.1 to 3.6 V and the communication method with the sensor is via the I2C protocol. This sensor is developed by Sensirion, a manufacturer whose sensor models are widely implemented in commercial environmental monitoring equipment. The quality of the sensors, its I2C communication protocol and the great expansion that it has in environmental monitoring systems were the reasons to use this sensor in the present research.
- BMP180 [48]: it is a low-cost sensor for measuring barometric pressure and temperature. It allows a measurement range of between 300 and 1100 hPa and $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, with a typical accuracy of $\pm 1\text{ hPa}$ and $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a resolution of 0.02 hPa and $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. The sensor needs to supply voltage from 1.8 to 3.6 V and uses the I2C bus as communication protocol. Similarly to the SHT21, the BMP180 sensor is also widely used in commercial systems when the measurement of the atmospheric pressure is required. Due this and to the fact that it employs also the I2C communication protocol, it was considered an appropriate model for its evaluation.
- BME280 [49]: this is the evolution of the BMP180 sensor as it adds the possibility of measuring relative humidity. It allows measurement ranges between 300 and 1100 hPa , $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature and 0% and 100% . It has a typical accuracy of $\pm 1\text{ hPa}$, $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3.0\%$ with a resolution of 0.18 Pa , $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 0.008% respectively. Like the BMP180 it needs a supply voltage of 1.8 to 3.6 V and uses the I2C of bus as communication protocol. It was decided to evaluate this sensor to see if its use carries a clear advantage over its predecessor BMP180.
- Magnetic switch sensor: This is a device composed of two elements, a magnet and the reed switch. The reed switch consists of an encapsulation containing two electrically isolated contacts. However, when there is a magnetic field with enough intensity close to it, the magnet, the contacts are closed. This sensor is widely used as a detection system for opening doors and windows, placing the reed switch on the fixed part and the magnet on the moving part of the element.
- CO₂ sensor: the employed sensor is the MH-Z19 [50]. It is a common type, small size sensor, using non-dispersive infrared (NDIR) principle to detect the existence of CO₂ in the air, with good selectivity, non-oxygen dependent and long life. Built-in temperature sensor can do temperature compensation; and it has analog voltage output and

digital output through the UART or PWM signal output communication protocols. Its operating voltage is between 3.6 and 5.5 V , allowing a concentration measuring range between 0 and 5000 ppm with an accuracy $\pm 50\text{ ppm}$. The preheat period time is about 3 min and the CO₂ concentration value becomes stable. These types of sensors have higher energy consumption than those based on electrochemical methods, but are widely used for real-time monitoring, due to their higher durability, reliability and accuracy [51].

- OLED display: we use an OLED module of $0.66''$ in order to be able to reflect the registered values in the equipment in situ. Due to its shield type design, the display can be connected to the microcontroller using the I2C protocol and thus allowing a very compact device. The operating voltage is 3.3 V . This display is made up of 64×48 white pixels and does not need backlight thus reducing consumption

As can be seen, all the used equipment has been based on Open Source Platforms (OSP), from hardware to software. This aspect made it possible to develop on-demand equipment according to the specific needs of the project. In turn, it has been able to obtain, treat and share all the collected information in an open way and without any restrictions of use.

3.3. Sensor calibration

In order to verify that the temperature and humidity sensors are working properly, they were calibrated using known references within the expected working ranges.

The procedure for the calibration of the temperature sensors was carried out within a climatic chamber, as seen in Fig. 3. For this purpose, temperature steps of $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ were programmed from the usual extremes of the climate under study, thus the measurement range being between $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Then, a calibrated temperature datalogger was used as a reference for the used sensors. The used datalogger as reference was the AHLBORN 2549 with the FHAD 46-2 sensor with an accuracy of $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. The sampling interval was of 1 min and the reference is maintained for 90 min at each temperature step.

The calibration of the moisture sensors was carried out using the saturated aqueous solutions method [52,53]. This procedure is based on the use of air-tight vessels in which the aqueous solution is introduced to achieve a hygrothermal equilibrium within the enclosure in Fig. 5. In order to achieve a uniform distribution of the humidity in the inside, the vessels have some fans that homogenize the indoor environment. The different degrees of humidity are obtained by different aqueous solutions of saturated salts at a constant temperature. In this study, solutions that cover a wide range of values in the laboratory test conditions: temperature of $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ have been used. The relative humidity balance is performed at the following points: LiCl 11.30% , MgCl

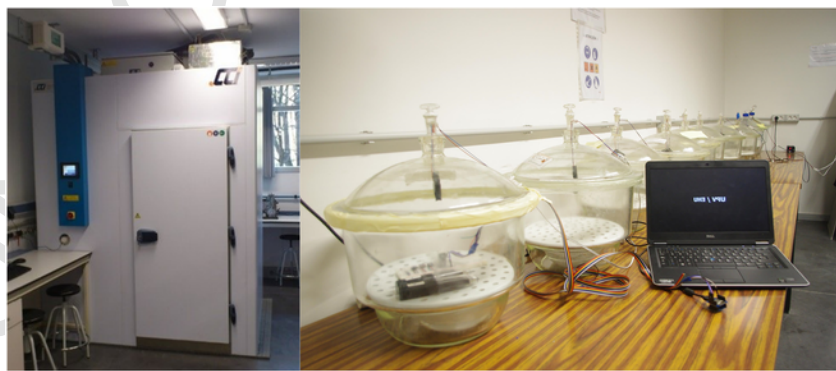


Fig. 3. Laboratory equipment for calibration comprised by the climatic chamber and the vessels.

2 32.89, Mg (NO₃) 2 53.30%, KCl 84.64%. Next, the sensors are introduced to be calibrated inside the vessels and it is expected that a balance will be produced in order to register the values. The recording interval was of 1 min with that recording being maintained for 24 h in each dessicator.

Finally, after the adjustment protocols, the calibration curves were obtained, see Fig. 4. These curves allow the correspondence between the measured value of the sensor and the reference value to be known. With these adjustment curves, the transfer functions of each temperature and humidity sensors were corrected to establish the calibration reference. For this purpose, both for the temperature and humidity of each sensor, the adjustment quadratic equation and coefficients (C1, C2 and C3) were implemented in the programming code of the monitoring system. Through this setting, the initial recorded values would be adjusted, thus the monitoring device registers directly calibrated values.

3.4. Case study

In order to verify the correct operation of the monitoring equipment, it was decided to implement the system in a housing unit. This apartment is located in a building in the city of Donostia-San Sebastián

(northern Spain), as seen in Fig. 5. The building is going to undergo a complete transformation through an energy refurbishment within the EuroPHit European Program [54].

San Roke Social Housing is a four floor building with 10 apartments and a common area. The thermal envelope has no insulation at all. Ventilation is natural, using opening window sections. Original windows and shutters are made of timber with single glazing, but some owners have replaced them during the years. The poor façade condition, which is made of load bearing bricks, forced the owners to take measures after compulsory technical inspection. The roof is built with timber and was improved in 1994.

The apartment, of 46 m², has an open area dedicated to the living room, dining room and kitchen, a bathroom and a double bedroom. It is oriented to the North and the East. As for its state of conservation, it is observed that a recent remodelling of the house has been carried out in terms of construction, equipment and furniture.

The monitoring equipment has been located in the main room because it represents the general behaviour of the house with greater accuracy, due to its varied use and because the users have informed that it is the place that they usually use in general way. On the other hand, the equipment has been located near a northern facing window to avoid the external sensor being affected by the direct radiation and, in

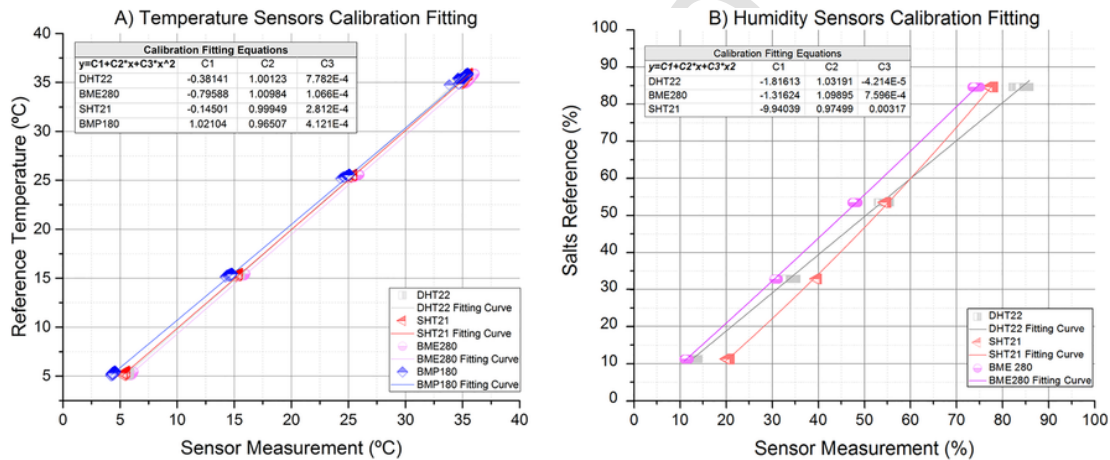


Fig. 4. Sensors calibration curves: A) Air temperature and B) relative humidity.

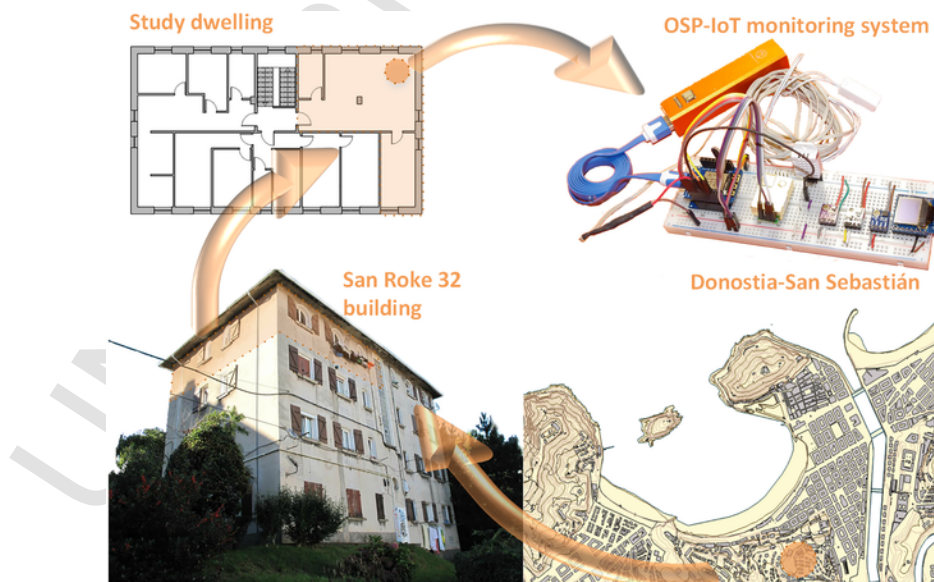


Fig. 5. San Roke 32 case study, location of the building, the dwelling and the monitoring system.

turn, to avoid excessive wiring from the microcontroller to the point of measurement. The rest of the sensors are located next to the microcontroller, thereby obtaining compact equipment of small dimensions.

4. Analysis

This section tries to analyze the most determinant aspects of the study that have been carried out. In order to do this, the general recorded results during the monitoring of the dwelling will be presented first so as to know its hygrothermal behaviour and its IAQ. This section also includes a comparison between the obtained results with the prototype and the records made with a commercial system in order to do their verification. The second section, based on the obtained results, will focus on the responses that the sensors have presented. The objective is to determine which sensor could be the most suitable for future investigations. Finally, a discussion of the prototype as a whole is carried out in relation to relevant topics of monitoring systems. Battery life, data storage capacity and the cost of the equipment have been previously indicated as very important points when making decisions in monitoring campaigns and therefore attention has been given to this topic in this section.

4.1. General results and verification

As for the temperature registers, there are 4 sensors that allow the values to be registered, three of them have been used for the interior conditions (DHT, SHT21 and BMP180) and one of them for the exterior ones (BME280). The commercial equipment that was used to verify the correct performance of the developed system was also located in the interior of the apartment. This system is the HT-2000 model, which employs the SHT30 sensor for the measurement of temperature and humidity, and the OGM-220 sensor for the measurement of CO₂ concentration. Both sensors are very similar to those used in the developed prototype, so it was considered an appropriate tool to perform the measurements. On the other hand, this system does not offer the possibility to measure the atmospheric pressure, so for this purpose, a weather station near the building (2.4 km) was used as a reference for the verification. The model at the station is the Davis Vantage Pro2 Plus.

The obtained results are reflected in Fig. 6. The graph shows the temperature values offered by the respective sensors adding in turn the error band of each sensor. Two additional values corresponding to the values of the sensors were added after the application of the calibration curve. On the one hand, the case of the external sensor was added and on the other hand, the average of the internal sensors. In reference to the obtained values with the prototype, we can observe that the interior of the house during the registered period has been found to an average temperature of 23.43 °C, with extreme values of 21.53 °C and 25.10 °C. Regarding the external conditions, the average value is of 20.25 °C, with a minimum value of 14.90 °C and a maximum of 26.28 °C.

On the other hand, as well as for the temperature values, the directly obtained moisture records with their error bands have been represented and corrected values have been added after the calibration. As for the external values obtained with the BME280 sensor, the large differences that exist throughout the measurement are reflected. It produces a humidity peak of 97.48% and a minimum of 51.70%, having an average of 80.80%. This fact clearly reflects the concordance between the period of the day in relation to relative humidity. That is, the high peaks of relative humidity caused by the temperature drops at night, and the relative humidity drops when the daytime temperature rises. In general terms, it is clearly seen how high humidity, characteristic of the oceanic climate to which the case study belongs, affects the interior of the house. In the interior there is a high concentration of relative humidity that makes the house be at the limit of the comfort con-

ditions, due to the lack of a conditioning system that dehumidifies the air. As a result, an average value of 70.62% is obtained, with a maximum of 79.07% and a minimum of 59.02%.

As to the monitored IAQ through MH-Z19 sensor, during the monitored period the concentration average is 889 ppm, reflecting an acceptable IAQ. As observed, there are several peaks that exceed the recommended limit of 1000 ppm [55,56], reaching peaks of 1961 ppm. In turn, it should be taken into account that the monitored period was in the summer. In case monitoring during the heating period had been carried out, these values would have reflected a higher average and higher peaks, worsening the situation due to the use of a cabinet gas as a heating medium. Its combustion not only generates higher concentration of CO₂, but increases relative humidity and reduces the amount of oxygen in the air, substantially reducing the comfort conditions of the home.

Finally, the atmospheric pressure values are presented both inside and outside the house. As it can be seen, there is no difference between the two values since both sensors were located at the same altitude, nor does there exist any constant mechanical ventilation system in the dwelling that produces a difference of pressure with respect to the external conditions.

In relation to the behaviour of the developed system compared with the commercial equipment, both values show to be very close with the exception of the atmospheric pressure as seen in Fig. 6. The descriptive statistical analysis, Table 1, shows that the mean differences between the obtained values with the prototype and the commercial equipment are within the margin of error of the sensor, except for the CO₂ concentration variable and the previously cited atmospheric pressure. Regarding the CO₂ values, it should be noted that the sensors of the prototype are in direct contact with the environment while those of the HT-2000 are inside the equipment casing, which has air circulation grilles, and therefore the exposure of both systems is not exactly the same. The recorded maximum and minimum differences represent singular values during very short intervals of time in which large variations are produced, such as those produced by opening the window; therefore they aren't as representative as seen in the standard deviation. On the other hand, in the recorded values of atmospheric pressure, the location of the reference weather station must be taken into account since it was next to but not in the same location as the sensor used in the commercial equipment. Between both systems there was an altitude difference of 44 m. Assuming the previously recorded mean interior and exterior temperatures of 23.43 °C and 20.25 °C, the measured mean pressure difference values between the two points, Table 1, matches the altitude difference.

In general terms, the results show a behaviour of the apartment according to the construction typology and the climate to which it belongs. That is, moderate outdoor temperatures and high relative humidity which, as mentioned, has a significant effect on interior hygrothermal conditions. The IAQ also shows common CO₂ concentrations in this typology of buildings in which ventilation is produced by natural means. A fact to highlight is the clear impact of the window opening effect that is detected when the switch type sensor is implemented. This is reflected in three of the pollutant concentration peaks that occurred during the monitored period (02/07/2016, 03/07/2016 and 06/03/2016) which were counteracted with window opening and the rapid effect of quality improvement of the indoor air to concentrations close to 400 ppm. In turn, despite the good operational use by the user and the effectiveness of this measure, the interior temperature is affected by lowering approximately 1 °C. Although during the summer it can be an aspect that improves the interior comfort, in the heating period it would suppose as much of a detriment in the comfort as an energetic loss. In addition, through the elaborated verification with the commercial system, it can be considered that the developed prototype showed appropriate behaviour during the measurement week. The

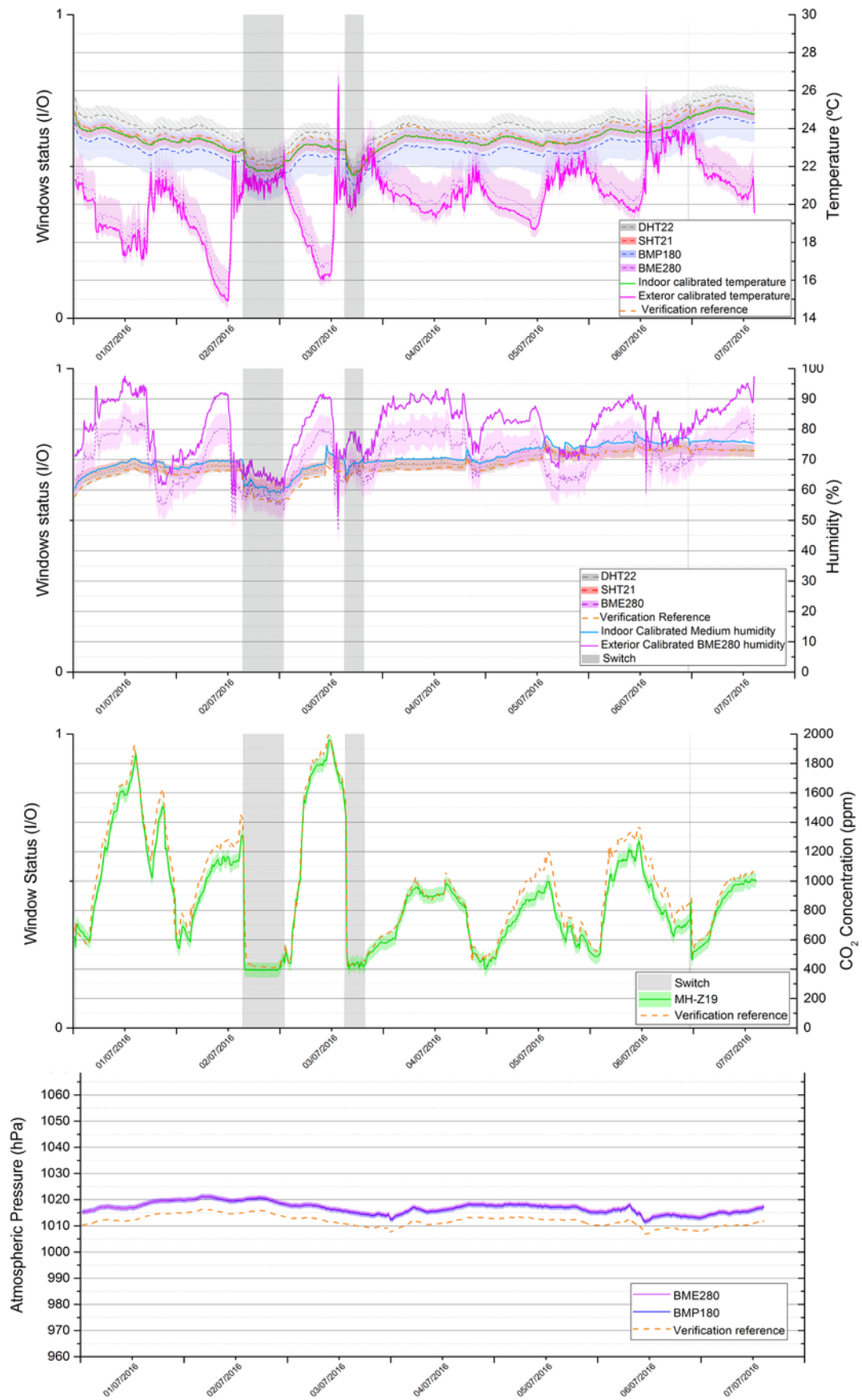


Fig. 6. Recorded values with the self-developed monitoring system and the employed systems for the verification.

Table 1
Statistical analysis of the measurement variables' differences between the commercial system and the prototype.

	Temperature (°C)	Humidity (%)	CO ₂ concentration (ppm)	Atmospheric pressure (hPa)
Mean	0.249	- 3.006	68.568	5.160
Minimum	- 0.132	- 7.375	- 304	4.574
Maximum	0.618	- 0.998	489	5.744
Median	0.244	- 2.950	57	5.165
Standard deviation	0.136	0.628	61.620	0.191
Validation reference accuracy	± 0.6	± 3	± 50	± 1.0

temperature and humidity values were within the expected margins. Also the atmospheric pressure values agree with those recorded by the weather station considering the existing altitude difference. Only the CO₂ measures were slightly above the expected error, probably due to the difference in casing protection between the two systems and due to the high sensitivity of these types of sensors. Nevertheless, taking these results into account, the developed prototype can be considered a suitable system for environmental monitoring.

4.2. Comparative sensors results

Now the comparative analysis of the used sensors will be carried out. Only the temperature and humidity sensors will be evaluated, due to the fact that several models have been used and that they have been calibrated.

Fig. 7 shows the behaviour of the four sensors that measure the temperature in comparison with the reference sensor in the calibration process. The graphs include both the error regarding the calibrated reference and the error of each sensor indicated by the manufacturer, re-

flected by shading. In general terms, it can be observed that most errors obtained are within the expected limits. However, the points recorded with the sensor DHT22 and the SHT21 in the extreme calibration of 35 °C slightly exceed the expected error. On the other hand, it should be mentioned that both the BMP180 sensor and the BME280 are specific sensors for the measurement of atmospheric pressure. These use the temperature value as a correction for the measurement of atmospheric pressure and due to this, its accuracy of ± 1 °C is lower than the one in the other two sensors. However, their behaviour is within specified ranges.

Regarding the behaviour of the sensors in relation to humidity, Fig. 8 shows the error of the measurement made in comparison with the reference of the salts and, as in the previous case, the error tolerance indicated by the manufacturers is added by means of shading. The DHT22 sensor that has been used has shown a reliable behaviour in the analysis performed. The errors obtained are within the margins indicated by the manufacturer. Unlike, the SHT21 and BME280 sensors, as graphs reveal, respond in a way that has nothing to do with the errors specified in the datasheet. Although the SHT21 at 53.3% humidity was

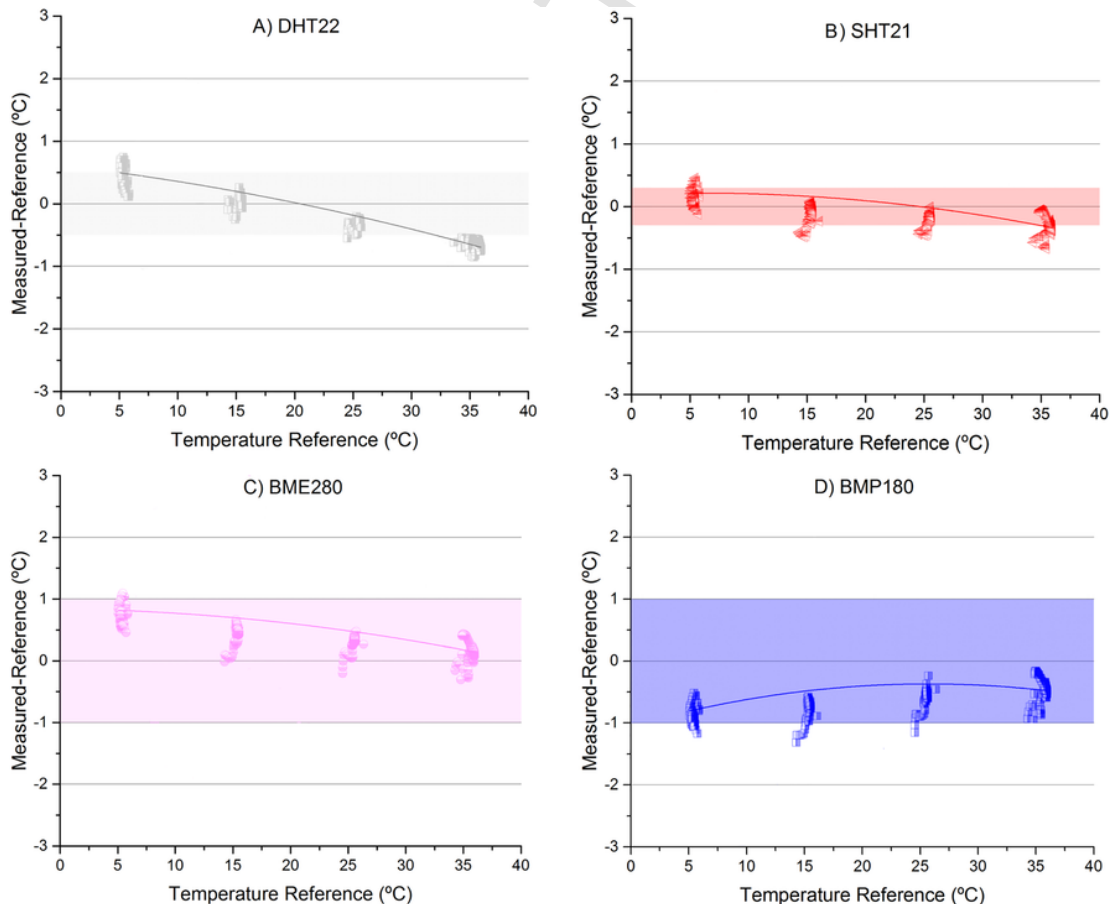


Fig. 7. Comparison between the obtained errors in the calibration process and the manufacturer indicated errors of the temperature sensors.

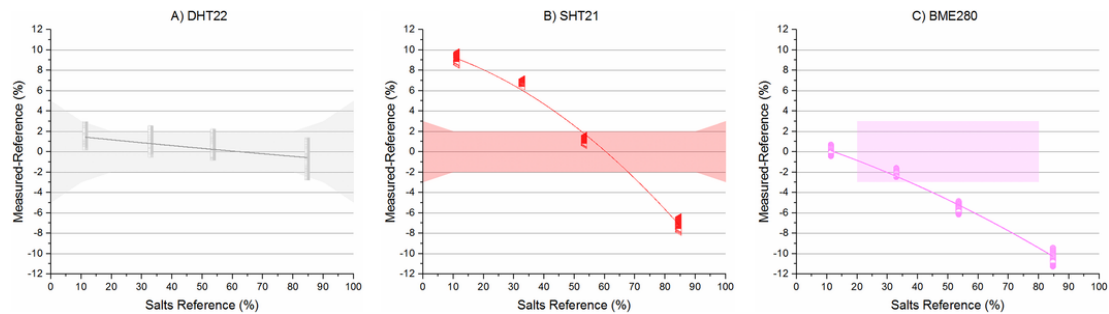


Fig. 8. Comparison between the obtained errors in the calibration process and the manufacturer indicated errors of the humidity sensors.

reliable, it has behaved in an antagonistic way in the rest of the values, just as the BME280 has behaved in the case of 32.9%. In spite of this, after the calibration process, it was possible to correct such deviations, thus providing consistent results.

The results obtained show a correct behaviour for temperature measurements as well as several unexpected aspects in the case of humidity. The DHT22 has been the only sensor that without the calibration has offered suitable values for the two parameters to be evaluated, and this makes it a suitable sensor for this application. However, one of the main drawbacks is closely related to the communication method with the microcontroller. It uses the Wire protocol, so each sensor of this type requires an input connection to the microcontroller and this can be a handicap in those projects that require a large number of inputs.

On the other hand, there are three more sensors that use the I2C protocol as a communication method and thanks to this have the advantage of being able to connect several sensors in parallel without the need for a greater number of digital inputs. In the moisture calibration process, both the SHT21 and the BME280 showed distant results to those of the reference salts. However, the calibration allowed the obtained results to be collected. One of the advantages of the BME280 is that it offers the measurement of atmospheric pressure which makes it more complete than the SHT21. However, it should be emphasized that the BME280 is a specific pressure and humidity sensor which, like the BMP180, uses the temperature value as a correction for the atmospheric pressure measurement. Due to this, the precision of the temperature measurement of both is smaller than the one offered by the SHT21, specifically for the measurements of temperature and humidity.

In conclusion, according to the obtained results, the election of a sensor depends on the application and the degree of the required precision. The DHT22 sensor shows the best performance and is ideal for those projects with few measuring points since it requires a digital input for each used sensor. The SHT21 could be used as a more accurate sensor but humidity calibration should be carried out with a greater frequency. On the other hand, the BMP180 or BME280 could be used as combined atmospheric pressure and temperature sensors in those cases where the precision is not an essential aspect. On the other hand, for those projects in which the monitoring of the three parameters and a high precision is required, it is recommended to add a specific sensor such as DHT22 or SHT21 to the combined pressure sensor.

It should be noted that the main objective of the study is the monitoring of the analyzed apartment and not the exhaustive analysis of the different sensors. However, the study that has been carried out has made it possible to compare the different behaviours of the different sensors clearly reflecting the situations which a researcher could face in a particular moment. A more exhaustive comparative study would require the use of several sensors of each model. This would allow a more representative analysis to be obtained and would allow a rejection of sensors with singular behaviour. In spite of this, the results obtained corroborate the imperative need to ensure the measurement values by means of a previous calibration and a recalibration with the

necessary frequency. The reason for this, as it has been pointed out, is that the humidity sensors present behaviour modifications over time.

4.3. Prototype analysis

As it has been observed throughout the study, the requirements that had been set as objectives in the 3.2. *Development of the prototype* section have been fulfilled. It has been considered appropriate to explain certain related findings, due to their relevance in monitoring processes and therefore in SICB area.

One of these main requirements to fulfill was related with the data collection security in case of loss of the wireless connection and/or loss of power supply. The greater or lesser battery life and the offered safety margin of collecting data in the event of a power outage will depend on the energy consumption. The developed equipment was constantly powered by a safety supply system. For this, a power bank was implemented that was connected to the power supply and in turn to the monitoring equipment. In case of a possible power outage, this design allowed a 2200 mAh storage to be available from the power bank that would supply the monitoring system. To prolong the battery life as much as possible, it was necessary to perform an energy optimization of the system and for this it was necessary to proceed to “sleep” the microcontroller and “wake it up”. This was possible through the *ESP.deepSleep* programming command. In this way, only the high consumption takes place at the moment of taking measurements and sending the data, since the rest of the time the device is in hibernation mode.

In order to verify the energy consumption of the equipment another tool, based on OSP, was elaborated to carry out current measurements. For that, a high precision analogic to digital converter (ADC) of 16 bits was added. The model, ADS1115, allowed voltage values with very high resolution to be obtained. Also, it was added 1 Ω resistor in series to the power supply of the monitoring systems and the voltage drop in the resistor was measured by the equipment. As the employed resistance was of 1 Ω , according to Ohm's law, the voltage records made correspond to the current flowing through the circuit.

To carry out the measurements, the current draw value was recorded over 50 min with 10 ms of intervals between the measurements. The average consumption of all registered values was of 15.54 mAh. A more detailed evaluation of this data allows a consumption pattern and three different consumption phases to be clearly distinguished, as seen in Fig. 9. The first one has the lowest consumption, with an average value of 5.65mAh during their 4770 ms of duration, in which the microcontroller is in sleep mode, but the sensor MH-Z19 is in the state of rest, which produces a slight parasitic consumption. This state occurs intermittently approximately every 5 s. In the second phase, the microcontroller is still asleep but the CO₂ sensor is switched on, producing peak consumption near 225 mAh that is reduced until approaching the 88 mAh. This phase has a consumption average of 103.66 mAh over its 530 ms of duration. Finally the third phase consists of the awakening of the microcontroller, in which it takes mea-

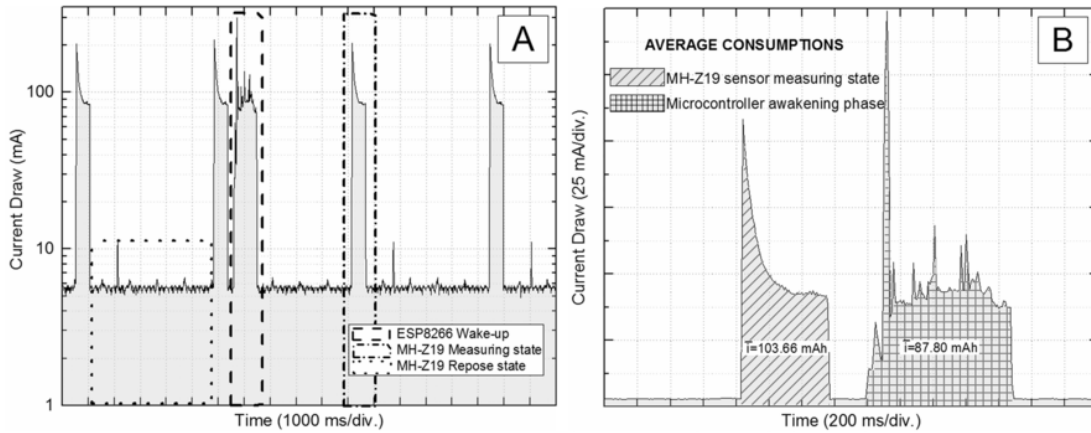


Fig. 9. Current consumption analysis of the monitoring prototype. A) Detected general consumption pattern. B) Detail of average consumption during microcontroller wake up and the measurement moment of the MH-Z19 sensor.

measurements of all sensors, sends them via WiFi and saves them in the microSD. This phase has a duration of 890 ms and an average consumption of 87.80 mAh. The third phase occurs only in the configured record intervals, in the developed case every 10 min. On the other hand, the first and second phases are constant throughout the monitoring. So the consumption of the developed equipment as a function of time between measurement intervals, $t(s)$, would be defined by the following expression (1):

$$\bar{I}(t) = \frac{\left(\frac{103.66 \text{ mAh} - 0.53 \text{ s} + 5.65 \text{ mAh} - 4.77 \text{ s}}{5.3 \text{ s}} \right) \cdot (t - 0.89) + (87.80 \text{ m}}{t}$$

According to these measurements, the autonomy was greatly limited due to the mode of operation of the CO₂ sensor and its parasitic consumption. This must be constantly turned on to obtain consistent results and therefore it was not possible to develop a low-power programming code. The previously recorded average consumption of 15.54 mAh with a power bank of 2200 mAh would allow the equipment of approximately 141 h to be autonomous.

Although the application of the deep sleep mode substantially reduces the energy consumption of the systems, is not well appreciated with the previous prototype. As it was observed and as an example, excluding the CO₂ sensor, the application of a low-power programming code would be able to reduce the constant consumption of the system without deep sleep mode to 0.56 mAh, Fig. 10. As in the initial system,

the consumption peaks would be produced only at the time of recording and sending the values of the sensor during 880 ms, thus obtaining an average consumption reduction from 83.79 mAh to 0.73 mAh while operating with a 10 min measuring interval. This would allow the energy autonomy with the 2200 mAh power bank to be increased approximately from 26 to 3013 h.

On the other hand, regarding the possible loss of the wireless connection, the code was developed taking into consideration this possible issue. For this purpose, when the microcontroller is in the programming line of the server connection and it does not connect, it automatically skips the order, proceeds to continue with the code that goes on, saves the data of the sensors and starts again with the loop.

In regards to the previously cited data storage capacity, although today commercial equipment is beginning to expand its capacity, in most cases the storage offered is so low that it is necessary to periodically collect the data in situ and reset the memory. In addition, it should be added that in building monitoring campaigns it is necessary to measure over long periods of time with relatively high frequency intervals (1–60 min) which considerably increases the data volume and the necessity of high storage capacity.

The storage size in the developed prototype depends on the number of columns (measurement variables) to be stored. As an example, the evaluated case had 11 sensor value columns during the monitored period with 10 min of interval between the measurements and the generated .txt file was of 62 kb. The project used a microSD of 8 Gb, so the required space compared to the storage capacity was negligible. In addition, the microSD reader allows cards of greater storage of up to 32 Gb to be used, which is why the previously presented issues of stor-

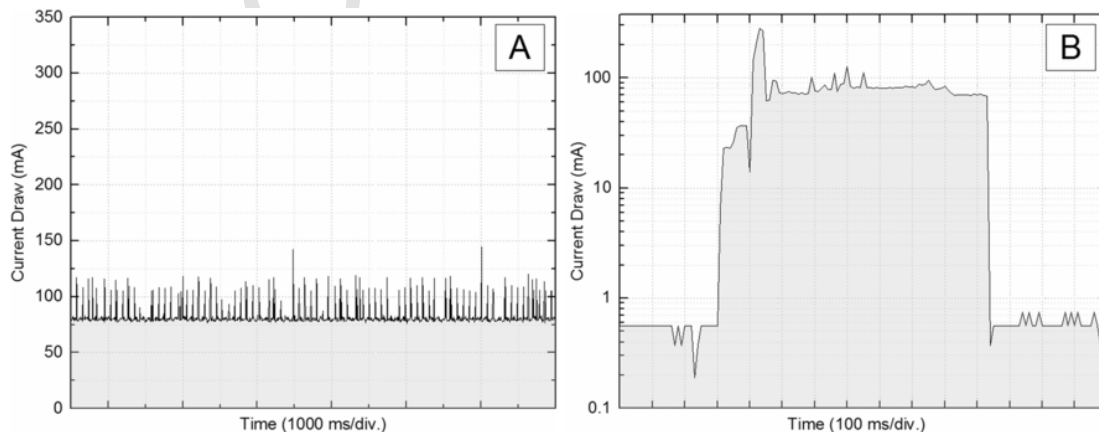


Fig. 10. Effect on the current draw through the activation of the deep sleep mode on the system: A) Disabled B) activated.

age would be solved and the necessity of collecting the data and resetting the memory in situ periodically would also be avoided.

Last but not least, the cost was another challenge to meet to successfully implement monitoring systems in Smart Environments. The cost of the equipment's has been identified as the main factor when investing in measuring equipment [29]. This same review also indicates that the "ease of deployment" is one of the key factors that influence the selection of monitoring solutions and underlines that wireless sensors reduce installation costs and offer great flexibility. Several of the previously mentioned researches [18,19,22,57] highlight, among other aspects, the low economic cost of open-source systems as one of its strengths. This aspect can be very useful in research projects where the costs attributed to the acquisition of scientific equipment are very high due to the scale of application.

This is the case of the study by Jáñez Moran et al. [58] which analyzed the results obtained from a set of European projects that aimed to reduce energy consumption through the application of ICT in various pilot buildings. Its economic analysis indicated that the installation cost of the equipment's ranges from 300 € to 1000 € per dwelling and 6.25 €/m² at tertiary buildings. Finally, the study highlights the importance of carrying scale policies and the need to reduce equipment costs.

The developed system has an approximate cost of 90 €. Nevertheless, it had several sensors that offered the same measurement variable due to the existing objective of comparing the sensors. As an example, if the temperature and humidity measurements were required, the price would be 50 €, and 55 € if the atmospheric pressure as measurement variable is desired. The price of the developed device depends primarily on the necessary "base" elements as the own microcontroller board, OLED screen, memory microSD, power supply or the auxiliary fungible elements. The additional sensors barely increase the price. So according to Pearce [18], as the complexity of the developed instrumentation increases, the obtained savings compared to the acquisition of commercial equipment could be greater.

As it was presented, current issues in monitoring systems were solved through the developed prototype. Connectivity failures, low battery autonomy, the equipment's high acquisition costs, and poor data storage capacity are no longer reason to interfere with the existing need to collect information in Smart Environments. It can be concluded that the combination of the OSP and IoT could be an innovative method which offers a clear advantage for the development of monitoring projects.

5. Conclusions

This research has developed a system, based on the OSP and IoT platforms, in order to monitorize buildings' environmental conditions. The methodology that has been followed has been presented, as well as the design of the developed equipment and the results of the monitored parameters, also developing a later analysis of them. Finally, some relevant aspects such as the energy consumption, development costs and data storage of the prototype have been highlighted.

During the test period, the obtained results have revealed a satisfactory performance of the developed system. With the combined use of temperature and CO₂ sensors with the window sensor, we have been able to show the direct influence of the IAQ by the occupants in the apartment through their behaviour with the window use. The results show how the calibration of the humidity sensors has been of paramount importance to obtain concordant values. Otherwise, as it has been observed, its initial behaviour would present appreciable mismatches and inaccuracies.

On the other hand, these platforms allow research groups who frequently harness instrumentation to register and monitor variables, to develop powerful and versatile applications. Even if at first initial diffi-

culties, which appear because the technology is not completely developed, could discourage the researcher, once applications have been developed and results are satisfactory, the perspective changes drastically, thus becoming an alternative to take into account. This is why this tool is of great use for those who record and treat data. Monitoring and process control are common tasks among researchers. Consequently, a basic knowledge of the use of these tools could drastically boost projects that otherwise would need considerable investments and the efforts become fructiferous in short term.

Another of the advantages to emphasize is the freedom of development that the platform allows. Although commercially it might be feasible to acquire equipment for the monitoring of a specific parameter (CO₂, illumination, flow, etc.), it would be very difficult for it to combine the measurement of several of these parameters and even to transmit the records wirelessly. In this particular project, it has not been possible to find portable equipment of fast deployment at a reasonable cost for the measurement of temperature, humidity and CO₂ concentration that could transmit the data through a WiFi network. Through this prototype, it has been possible to solve this and even extend the measuring capacity with other variables such as atmospheric pressure or the sensor switch.

The development of this paper has detected further work that can be developed in future research that will further improve the monitoring processes and thus the SICB area. Real-time representation dashboards such as Google Data Studio will allow the graphical presentation of the data to be improved and offer a more user friendly tool. These kinds of tools have complete compatibility with the methodology carried out in the present study so its application could be of great interest.

The development of tools based on IoT platforms brings with it new additional challenges and issues that must be taken into consideration. The stability in the connection of WiFi networks is one of the remarkable points. Long distances or possible obstacles between the receiver and the transmitter can hinder the wireless connection. The use of additional external antennas, improvements in the structure of the programming code itself, the employment of travel routers or the use other alternative IoT protocols such as Sigfox are different solutions that could improve this issue. Also, the increase in the number of intelligent devices connected to the IoT carries with it a concern that is growing, the security and privacy. Failure to take these facts into account carries possible threats to the devices and data collected in relation to their accessibility, integrity, confidentiality and may cause risks related to identity theft, for example. Due to this, the developed devices must be able to offer such privacy and security as is the case of those platforms based on the SSL standard that allows the data to be encrypted during their transmission process. Due to the great relevance and existing solutions in this area, it would be of great interest to develop future works with the objective of evaluating the most appropriate solution for devices like the one developed in this research.

In addition, the noise is a very relevant factor which has to be taken into consideration. Analog sensors are very sensible to noise because the variations they produce during measurements are very low, in the order of mV, and therefore any interference from the environment can easily distort that value. Conversely, the digital signals work with "high" and "low" values and therefore the noise that can affect the signal must be of great amplitude. Therefore, digital sensors are more stable against noise than analog sensors. The developed monitoring device has employed only digital sensors. In this way, the noise problem is substantially reduced so that no effect has been detected on the results. Also, it would be interesting for future research to additionally employ techniques as filtering algorithms through the programming code itself thus damping the noise against the useful signal or cable shielding in the case of using analog sensors. In relation to the power supply, some tests have allowed us to detect that certain current adapters also gener-

ated noise thus affecting the measurements and therefore supposing another point that should be taken into consideration in future projects.

Finally, this research has been dedicated to capturing variables with a certain type of sensors. However, it has been proven that this solution can be scalable for diverse purposes required in Smart Cities and their SICB with other kinds of sensors (thermocouples, current transformers, flow meters, luminosity sensors etc.) and actuators (relays, solenoid valves, heaters, different kinds of motors, LED's, etc.) thus further opening the range of future developments in the building area and many others.

Acknowledgements

The authors are grateful for the fully offered availability provided by the home owners of the evaluated apartment.

Also, big thanks for Rehabilitaciones y Contratas IGARAN S.L and A + O Arquitectos for their participation and interest shown during the present study.

Additionally, we would like to thank the Laboratory of the Quality Control of Buildings of the Basque Government and the colleagues of ENEDI Research Group of the University of the Basque Country UPV/EHU for their invaluable technical support.

We would also like to thank Javier Martínez de Lizarduy from Meteo Arriola for the information provided by his weather station.

This work has been funded by the Researcher Training Program of the Department of Education, Language Policy and Culture of the Basque Government (Spain), with the PhD fellowship PRE_2016_2_0178.

References

- [1] A. Cocchia, Smart and Digital City: A Systematic Literature Review, Springer, Smart City, 201413–43, (ISBN: 978-3-319-06159-7).
- [2] L.G. Anthopoulos, Understanding the smart city domain: a literature review, In: Transforming City Governments for Successful Smart Cities, Springer, 2015. ISBN: 978-3-319-03166-8, pp. 9–21.
- [3] T. Kim, C. Ramos, S. Mohammed, Smart City and IoT, *Futur. Gener. Comput. Syst.* 76 (2017) 159–162, <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.03.034>.
- [4] P. Rizwan, K. Suresh, M. Rajasekhara Babu, Real-time smart traffic management system for smart cities by using Internet of Things and big data, In: Proceedings of IEEE International Conference on Emerging Technological Trends in Computing, Communications and Electrical Engineering, 2016, ICETT, 2017, (ISBN: 978-1-5090-3751-3).
- [5] X. Zhiqing, H. Jialiang, L. Haidong, On research IoT-based intelligent parking management system and its design, *Int. J. Smart Home* 10 (2016) 217–230, <https://doi.org/10.14257/ijsh.2016.10.5.20>.
- [6] S.P. Gupta, U.K. Pandey, Automatic and intelligent integrated system for leakage detection in pipes for water distribution network using internet of things, In: Smart Innovation, Systems and Technologies, 83, 2018, pp. 516–523, https://doi.org/10.1007/978-3-319-63673-3_62.
- [7] S. Wadekar, V. Vakare, R. Prajapati, S. Yadav, V. Yadav, Smart water management using IOT, In: 2016 5th International Conference on Wireless Networks and Embedded Systems, WECON 2016, 2017, (ISBN: 978-1-5090-0893-3).
- [8] D. Meana-Llorián, C. González García, B.C. Pelayo G-Bustelo, J.M. Cueva Lovelle, N. Garcia-Fernandez, IoFClima: the fuzzy logic and the Internet of Things to control indoor temperature regarding the outdoor ambient conditions, *Futur. Gener. Comput. Syst.* 76 (2017) 275–284, <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.11.020>.
- [9] A. Fensel, D.K. Tomic, A. Koller, Contributing to appliances' energy efficiency with Internet of Things, smart data and user engagement, *Futur. Gener. Comput. Syst.* 76 (2017) 329–338, <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.11.026>.
- [10] European Parliament, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Off. J. Eur. Union L* 153/13 (2010) <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>, (accessed November 14, 2017).
- [11] M. Economidou, B. Atanasiu, C. Despret, J. Maio, I. Nolte, O. Rapf, Europe's Buildings Under the Microscope. A Country-by-country Review of the Energy Performance of Buildings, Buildings Performance Institute Europe (BPIE), 2011, (ISBN: 9789491143014).
- [12] Agence internationale de l'énergie, Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a Clean Energy System, OECD/IEA, 2012, (ISBN: 978-92-64-17488-7).
- [13] C. Gorse, D. Johnston, D. Glew, F. Fylan, F. Thomas, D.M. Shenton, et al., Monitoring and measuring building performance, In: Building Sustainable Futures: Design and the Built Environment, Springer, 2015, pp. 35–61, (ISBN: 978-3-319-19347-2).
- [14] M. Banzi, M. Shiloh, Getting Started With Arduino: The Open Source Electronics Prototyping Platform, Maker Media, Inc., 2014, (ISBN: 978-1449363338).
- [15] E. Gertz, P. Di Justo, Environmental Monitoring With Arduino: Building Simple Devices to Collect Data About the World Around Us, O'Reilly Media, Inc., 2012, (ISBN: 978-1-449-31056-1).
- [16] J. Terés-Zubiaga, C. Escudero, C. García-Gafaro, J.M. Sala, Methodology for evaluating the energy renovation effects on the thermal performance of social housing buildings: monitoring study and grey box model development, *Energ. Buildings* 102 (2015) 390–405, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.010>.
- [17] A. Erkoreka, E. Garcia, K. Martin, J. Teres-Zubiaga, L. Del Portillo, In-use office building energy characterization through basic monitoring and modelling, *Energ. Buildings* 119 (2016) 256–266, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.030>.
- [18] J.M. Pearce, Building research equipment with free, open-source hardware, *Science* 337 (2012) 1303–1304, <https://doi.org/10.1126/science.1228183>.
- [19] N. Barroca, L.M. Borges, F.J. Velez, F. Monteiro, M. Górski, J. Castro-Gomes, Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures, *Constr. Build. Mater.* 40 (2013) 1156–1166, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.087>.
- [20] J. Hernández, H. Garrecht, G. Paci, S. Reeb, D. García, A ZigBee based building management system for heritage, *HVAC J.* 51 (2014) 28–32, (ISSN: 1307-3729).
- [21] F.J. Mesas-Carrascosa, D. Verdú Santano, J.E. Meroño, M. Sánchez de la Orden, A. García-Ferrer, Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture, *Biosyst. Eng.* 137 (2015) 73–83, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.005>.
- [22] L.J. Claros-Marfil, J.F. Padiál, B. Lauret, A new and inexpensive open source data acquisition and controller for solar research: application to a water-flow glazing, *Renew. Energy* 92 (2016) 450–461, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.037>.
- [23] F.J. Mesas-Carrascosa, D. Verdú Santano, J.E.M. de Larriba, R. Ortiz Cordero, R.E. Hidalgo Fernández, A. García-Ferrer, Monitoring heritage buildings with open source hardware sensors: a case study of the mosque-cathedral of Córdoba, *Sensors* 16 (2016) <https://doi.org/10.3390/s16101620>.
- [24] Smart Citizen, "Smart Citizen Project" Open Source Technology for Citizens Political Participation in Smarter Cities, in: <https://smartcitizen.me>, 2016, (accessed November 14, 2017).
- [25] I. Abubakar, S.N. Khalid, M.W. Mustafa, H. Shareef, M. Mustapha, Application of load monitoring in appliances' energy management – a review, *Renew. Sust. Energy Rev.* 67 (2017) 235–245, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.064>.
- [26] M. Royapoor, T. Roskilly, Building model calibration using energy and environmental data, *Energ. Buildings* 94 (2015) 109–120, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.050>.
- [27] S. Darby, The effectiveness of feedback on energy consumption, In: A Review for DEFRA of the Literature on Metering, Billing and Direct Displays, Oxford Environmental Change Institute, 2006 <http://www.eci.ox.ac.uk/research/energy/downloads/smart-metering-report.pdf>, (accessed November 14, 2017).
- [28] P.H. Shaikh, N.B.M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, T. Ibrahim, A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings, *Renew. Sust. Energy Rev.* 34 (2014) 409–429, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.027>.
- [29] M.W. Ahmad, M. Moursheed, D. Mundow, M. Sininni, Y. Rezgui, Building energy metering and environmental monitoring – a state-of-the-art review and directions for future research, *Energ. Buildings* 120 (2016) 85–102 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.059>.
- [30] European Parliament, Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32, *Off. J. Eur. Union* 315 (2012) 1–56 <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:en:PDF>, (accessed November 14, 2017).
- [31] European Parliament, Directive 2014/32/EU of the European Parliament and of the council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments (recast). Official Journal of the European Union. 96 (2014) 149–250, *Off. J. Eur. Union* 96 (2014) 1–102 <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0032&from=EN>, (accessed November 14, 2017).
- [32] E. Dave, The Internet of Things, How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011 https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf, (accessed November 14, 2017).
- [33] L. Atzori, A. Iera, G. Morabito, The Internet of Things: a survey, *Comput. Netw.* 54 (2010) 2787–2805, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
- [34] G. Says, 6.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2016, Up 30 Percent From 2015, Gartner, Inc., 2015 <http://www.gartner.com/newsroom/id/3165317>, (accessed November 14, 2017).
- [35] Q.M. Ashraf, M.I.M. Yusoff, A.A. Azman, N.M. Nor, N.A.A. Fuzi, M.S. Saharedan, et al., Energy monitoring prototype for Internet of Things: preliminary results, In: IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2015 - Proceedings, 2015, pp. 1–5, (ISBN: 978-1-5090-0366-2).
- [36] Y. Chen, Challenges and opportunities of internet of things, In: 17th Asia and South Pacific Design Automation Conference, IEEE, 2012, pp. 383–388, (ISBN: 978-1-4673-0772-7).
- [37] IOTSWC17, IOT Solutions World Congress. 3–5 October 2017. Barcelona (Spain), in: <http://www.iotsworldcongress.com>, 2017, (accessed November 14, 2017).
- [38] O. Haque, Pachube, in: <http://www.pachube.com>, 2004, (accessed November 14, 2017).
- [39] ThingSpeak, ThingSpeak: open source data platform and API for the Internet of Things, in: <https://thingspeak.com/>, 2010, (accessed November 14, 2017).
- [40] Plotly, Plotly: the modern platform for agile business intelligence and data science, in: <https://plot.ly/>, 2012, (accessed November 14, 2017).
- [41] Blynk, Blynk: First drag-n-drop IoT app builder for Arduino, Raspberry Pi, ES-P8266, SparkFun boards, and others, in: <http://www.blynk.cc/>, 2015, (accessed November 14, 2017).

- [42] Raspberry Pi Foundation, Official website of Raspberry Pi, in: <https://www.raspberrypi.org>, 2017, (accessed November 14, 2017).
- [43] Arduino, Official website of free hardware Arduino, in: <https://www.arduino.cc/>, 2017, (accessed November 14, 2017).
- [44] A. Back, Arduino or raspberry Pi?, in: <https://www.rs-online.com/designspark/arduino-or-raspberry-pi>, 2012, (accessed November 14, 2017).
- [45] Espressif-Systems, ESP8266: low-power, highly-integrated Wi-Fi solution, in: <https://espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>, 2017, (accessed November 14, 2017).
- [46] L. Aosong-Electronics Co., Temperature and humidity module. AM2302 Product Manual, <http://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/AM2302.pdf> (accessed November 14, 2017).
- [47] SENSIRION, Datasheet SHT21, Humidity and temperature sensor IC, in: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/2_Humidity_Sensors/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT21_Datasheet_V4.pdf, 2011, (accessed November 14, 2017).
- [48] Bosch sensortech GmbH, Final data sheet, BMP 180. Digital pressure sensor, in: <https://ae-bst.resource.bosch.com/media/tech/media/datasheets/BST-BMP180-DS000-121.pdf>, 2015, (accessed November 14, 2017).
- [49] Bosch sensortech GmbH, Final data sheet, BME 280. Combined humidity and pressure sensor, in: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/tech/media/datasheets/BST-BME280_DS001-11.pdf, 2015, (accessed November 14, 2017).
- [50] WINSSEN-Electronics, Intelligent infrared CO₂ module (Model: MH-Z19), Users manual. Version 1.0, in: <http://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Infrared%20Gas%20Sensor/NDIR%20CO2%20SENSOR/MH-Z19%20CO2%20Ver1.0.pdf>, 2015, (accessed November 14, 2017).
- [51] J. Kwon, G. Ahn, G. Kim, J.C. Kim, H. Kim, A study on NDIR-based CO₂ sensor to apply remote air quality monitoring system, In: ICCAS-SICE 2009 - ICROS-SICE International Joint Conference 2009, Proceedings, 2009, pp. 1683–1687, (ISBN: 978-490776433-3).
- [52] ASTM, 104-85, Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions, ASTM. American Society for Testing and Materials, 1985 <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E104-85R96.htm>, (accessed November 14, 2017).
- [53] L. Greenspan, Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions, J. Res. Natl. Bur. Stand. 81 A (1977) 89–96, <https://doi.org/10.6028/jres.081A.011>.
- [54] P. Albrecht, J. Otxoa-Errarte, Energy retrofit of the San Roque social housing under the standard of the passive house institute and the EuroPHit, Program (2016) <http://europhit.eu/san-roque-social-housing>, (accessed November 14, 2017).
- [55] ASTM, Standard D6245-12, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2012 <https://www.astm.org/Standards/D6245.htm>, (accessed November 14, 2017).
- [56] ANSI/ASHRAE, ASHRAE 62.1-2010 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Atlanta, GA, in: <https://www.ashrae.org/resources-publications/bookstore/standards-62-1--62-2>, 2002, (accessed November 14, 2017).
- [57] A. D'Ausilio, Arduino: a low-cost multipurpose lab equipment, Behav. Res. Methods 44 (2012) 305–313, <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0163-z>.
- [58] A. Jáñez Morán, P. Profaizer, M. Herrando Zapater, M. Andérez Valdavidia, I. Zabalza Bribián, Information and communications technologies (ICTs) for energy efficiency in buildings: review and analysis of results from EU pilot projects, Energ. Buildings 127 (2016) 128–137, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.064>.



GIPUZKOAKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE GIPUZKOA



Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos