



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Programa de Doctorat en Sostenibilitat

Institut universitari de recerca en Ciència i
Tecnologies de la Sostenibilitat

**Modelització energètica d'edificis a escala urbana a Andorra.
Reducció dels desajustos dels models mitjançant dades de
consum d'energia desagregades.**

Patricia Borges Martins

Tesi doctoral dirigida per:

Dra. Anna Pagès Ramon (Tecnologia de l'Arquitectura)

Dr. Oriol Travesset Baró (Andorra Recerca + Innovació)

Andorra, abril de 2023



Aquesta obra està subjecta a una llicència CC Reconeixement - No Comercial -
CompartirIgual (by-nc-sa)

No es permet un ús comercial de l'obra original ni de les possibles obres derivades, la
distribució de les quals s'ha de fer amb la mateixa llicència CC que regula l'obra original

AGRAÏMENTS

Voldria agrair en primer lloc als meus directors, l'Anna i l'Oriol, sense els quals l'assoliment d'aquesta tesi no hagués estat possible. Ningú més que vosaltres sap lo intensa que ha sigut la última etapa, i no tinc paraules per descriure lo agraïda que estic d'haver-vos tingut a tots dos al meu costat. Gràcies també per la vostra implicació i tot el suport, tant acadèmic com emocional, que m'heu donat quan més ho he necessitat.

Aquesta tesi doctoral no hagués estat possible sense les beques i ajuts de recerca del Departament d'Ensenyament Superior, Recerca i Ajuts a l'estudi que m'han permès tenir el finançament necessari per realitzar-la. Gràcies també als seus treballadors, en especial a la Marga i l'Helena, per la seva atenció i dedicació.

També agrair el suport puntual i desinteressat dels professors Antonio Sánchez Navas de la Universitat de Cádiz i al Jordi Ordóñez, per l'ajuda estadística, a les aportacions realitzades pel Dr. Michele Morganti i Dr. Marc Pons durant la revisió del document final, així com a FEDA i al Comú d'Escaldes-Engordany per les dades facilitades. També voldria agrair a la Silvia Aranda de la Universitat Politècnica de Catalunya per fer-me més fàcil tota la gestió dels tràmits administratius.

Gràcies també a tot l'equip d'Andorra Recerca + Innovació per haver-me acollit tant hospitalàriament i haver-me fet costat al llarg de tot el procés d'elaboració de la tesi.

També donar les gràcies als meus pares i a tota la meva família per creure en mi incondicionalment i sobretot per la seva paciència infinita. Gràcies també a la meva recent estrenada família política, així com als amic i amigues que han estat al meu costat durant els transcurso de la tesi, especialment a l'Aida i els nostres àudios infinits de whatsapp, així com a les meves amigues del pis d'av. Sarrià 137 i al *Sindicato* que malgrat no veure'ns tant com voldríem estan sempre que els necessites.

Per acabar, voldria agrair al Guillaume haver estat al meu costat malgrat la distància que ens ha separat durant molts moments, així com haver-me ajudat a mantenir als ànims. *Merci!*

Andorra, abril 2023

RESUM

El sector de l'edificació s'ha convertit a hores d'ara en un punt clau per a les polítiques i estratègies de reducció d'energia i emissions de gasos d'efecte hivernacle. L'important expansió urbana sense precedents soferta durant els darrers anys encara persistent a dia d'avui, així com l'elevat consum energètic del sector de l'edificació i la longevitat dels edificis construïts abans de l'aparició dels reglaments energètics són algunes de les raons que han posat al sector de l'edificació en el punt de mira per atènyer l'ambició objectiu de neutralitat carboni per l'any 2050.

Per reduir notablement el consum d'energia i les emissions, tant en edificis existents com de nova construcció, i assolir així els objectius climàtics, les ciutats necessiten d'una millor comprensió, no només del comportament energètic actual dels edificis sinó també de quins efectes futurs podrien tenir els programes integrals de reconversió energètica i els canvis en la infraestructura de subministrament d'energia. En aquest sentit, els models energètics d'edificis a escala urbana de tipus *bottom-up*, coneguts com a UBEM, estan considerats com una de les eines més prometedores en l'àmbit de la simulació urbana capaç d'incorporar diferents conjunts de dades sobre el parc edificat així com els factors externs que l'afecten. Malauradament, els desajustos entre els resultats d'aquests i les dades reals de consum energètic representen una barrera per a la seva utilització generalitzada en la presa de decisions polítiques. La reducció d'aquests desajustos és un dels principals reptes d'aquest camp d'estudi. Mentre la majoria de recerca realitzada amb aquest propòsit assenyala al calibratge dels UBEM com la solució a aquest desajust, pocs estudis aborden la qüestió de la fragmentació del parc edificat necessària per poder implementar models energètics a escala urbana.

Amb l'objectiu de reduir els desajustos entre els UBEM i la realitat energètica del parc edificat, l'eix central d'aquesta tesi consisteix en la definició d'una nova metodologia de fragmentació del parc edificat per l'obtenció d'arquetips representatius de la heterogeneïtat i diversitat energètica dels edificis utilitzant dades de consum energètic desagregades. Per poder-ne avaluar la seva validesa, aquesta s'ha implementat en un UBEM dels edificis residencials de la parròquia d'Escaldes-Engordany, al Principat d'Andorra. Els resultats obtinguts es comparen amb els de la metodologia de fragmentació més habitual, la fragmentació determinista, demostrant que la metodologia proposada s'ajusta millor a la realitat energètica del parc edificat.

Aquesta tesi contribueix en la transició energètica eficaç del sector de l'edificació mitjançant la generació d'eines que donen suport a la presa de decisions. A més de l'exploració d'aquesta nova metodologia, durant el transcurs de la present tesi doctoral, s'han generat una sèrie d'aportacions específiques d'utilitat per Escaldes-Engordany i, de forma extensiva, per al Principat d'Andorra. Entre aquestes destaca l'UBEM implementat, el primer model a escala urbana d'Andorra sobre el qual poder avaluar el potencial de les mesures d'estalvi energètic a implementar en el sector de la edificació.

ABSTRACT

The building sector has nowadays become a key point for policies and strategies to reduce energy and greenhouse gas emissions. The significant and unprecedented urban expansion that occurred in recent years and that is still ongoing today, combined with the high energy consumption that characterises the construction sector and the longevity of buildings built before the appearance of energy regulations, are some of the reasons that have put the building sector in the spotlight in order to achieve the ambitious goal of carbon neutrality by 2050.

To significantly reduce energy consumption and emissions, in both existing and new buildings, and thus achieve climate goals, municipalities need a better understanding not only of the current energy performance of buildings, but also the future impact that could have energy retrofit programs and changes in the energy supply infrastructure. In this sense, bottom-up urban building energy models, known as UBEM, are considered as one of the most promising tools in the field of urban simulation, as they are able to incorporate different data sets related to the building stock as well as the external factors affecting it. Unfortunately, the discrepancies between UBEM results and real energy consumption data are an obstacle to their widespread use in political decision-making. Reducing these discrepancies is one of the main challenges in this area of research. While most of the research carried out for this purpose points to the calibration of UBEM as the solution to this discrepancy, few studies address the issue of the building stock fragmentation, necessary to implement energy models at the urban scale.

With the aim of reducing the mismatches between the UBEM and buildings' metered energy consumption, the backbone of this thesis consists in the definition of a new methodology for building stocks fragmentation in order to obtain representative archetypes of the heterogeneity and energy diversity of the buildings using disaggregated energy consumption data. In order to evaluate its validity, this methodology has been implemented in a UBEM of residential buildings in the municipality of Escaldes-Engordany, in the Principality of Andorra. The results obtained are compared with those of the more common fragmentation approach, the deterministic fragmentation, and show that the proposed methodology better represents the building stock energy reality.

This thesis contributes to the effective energy transition of the building sector through the development of decision support tools. In addition to the study of this new methodology, a series of specific contributions useful for Escaldes-Engordany and, more

broadly for the Principality of Andorra, have been generated during the course of this thesis. Among these, the implemented UBEM stands out as the first urban-scale model in Andorra on which to evaluate the potential of the energy saving measures to be implemented in the construction sector.

ÍNDIX

1	Introducció	13
1.1	L'edificació. Un nínxol per explotar en el camí de la transició energètica.....	14
1.1.1	Perspectiva actual i futura del sector	14
1.1.2	Els models energètics urbans com a eina de suport a la presa de decisions.....	17
1.1.3	El Principat d'Andorra, l'oportunitat d'implementar un UBEM amb dades de consum d'energia.....	21
1.2	Objectius de la tesi	25
1.2.1	Objectiu general	25
1.2.2	Objectius específics	25
1.3	Metodologia general i estructura de la tesi	26
1.4	Referències.....	28
2	Caracterització del model	33
2.1	Estat de l'art.....	33
2.1.1	Informació climàtica	34
2.1.2	Geometria dels edificis i l'entorn.....	36
2.1.2.1	Volumetria del parc edificat.....	36
2.1.2.2	Finestres	38
2.1.2.3	Representació del terreny	39
2.1.3	Propietats no-geomètriques.....	40
2.1.3.1	Fragmentació del parc edificat.....	40
2.1.3.2	Definició dels paràmetres no-geomètrics	43
2.2	Caracterització del parc edificat d'Escaldes-Engordany	44
2.2.1	Dades disponibles	45
2.2.2	Informació climàtica	48
2.2.3	Geometria dels edificis i l'entorn.....	49
2.2.3.1	Volumetria del parc edificat.....	49
2.2.3.2	Finestres	52
2.2.3.3	Topografia del terreny	52
2.2.4	Propietats no-geomètriques.....	54
2.2.4.1	Fragmentació.....	54
2.2.4.2	Definició dels paràmetres no-geomètrics	57
2.2.4.2.1	Propietats dels paràmetres arquitectònics	58
2.2.4.2.2	Aparells elèctrics, sistemes de climatització i ús.....	58

2.3	Paràmetres d'entrada de l'UBEM d'Escaldes-Engordany	61
2.3.1	Fitxer climàtic d'Escaldes-Engordany	61
2.3.2	Geometria dels edificis i l'entorn d'Escaldes-Engordany.....	62
2.3.2.1	Dades vectorials 2D dels edificis	62
2.3.2.2	WWR dels edificis.....	62
2.3.2.3	Model digital del terreny	63
2.3.3	Propietats no-geomètriques.....	63
2.3.3.1	Arquetips representatius	63
2.3.3.2	Paràmetres arquitectònics dels edificis.....	66
2.3.3.3	Sistemes de climatització, aparells elèctrics i ús.....	70
2.4	Referències.....	81
3	Generació del model.....	89
3.1	Estat de l'art.....	89
3.1.1	Eines de generació existents	89
3.1.2	Flux de treball de les eines de generació.....	92
3.1.2.1	Format de les dades d'entrada.....	93
3.1.2.2	Generació del model energètic	95
3.1.3	Tipus de models tèrmics	96
3.2	Generació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany	98
3.2.1	L'eina de generació	98
3.2.2	Generació de la volumetria dels edificis i de l'entorn.....	100
3.2.2.1	Generació de la volumetria dels edificis.....	100
3.2.2.2	Definició de les zones tèrmiques	102
3.2.2.3	Generació de les finestres	103
3.2.2.4	Topografia del terreny	105
3.2.2.5	Exportació i organització de les dades a Rhinoceros.....	105
3.2.3	Assignació de les propietats no-geomètriques	107
3.2.3.1	Configuració de les zones tèrmiques	107
3.2.3.1.1	Materials de construcció i sistemes constructius	110
3.2.3.1.2	Horaris d'utilització	113
3.2.3.2	Configuració de les finestres	118
3.2.3.3	Configuració del terreny.....	119
3.2.4	Generació del model tèrmic i assignació del fitxer climàtic.....	120
3.3	Referències.....	121
4	Simulació del model i validació dels resultats.....	125
4.1	Estat de l'art.....	125
4.1.1	Simulació del model: eines i productes resultants	126

4.1.2	Anàlisi i visualització dels resultats	129
4.1.3	Validació del model.....	131
4.1.3.1	Dades d'ús d'energia mesurades.....	131
4.1.3.2	Indicadors de bondat d'ajust.....	133
4.1.4	Calibratge o ajust del model.....	134
4.2	Simulació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany	134
4.2.1	Tipologia dels resultats obtinguts.....	135
4.2.2	Resultats de l'UBEM d'Escaldes-Engordany	136
4.3	Bondat d'ajust de l'UBEM d'Escaldes-Engordany	144
4.3.1	Tractament de les dades.....	144
4.3.1.1	Dades d'ús d'energia mesurades.....	144
4.3.1.2	Dades d'ús d'energia simulades.....	146
4.3.2	Validació dels resultats	146
4.3.2.1	Indicadors de bondat d'ajust.....	146
4.3.2.2	Validació dels resultats de consum d'electricitat	148
4.3.2.3	Validació dels consums de fuel domèstic.....	159
4.4	Referències.....	160
5	Validació de la metodologia híbrida.....	163
5.1	Caracterització i generació de l'UBEM-determinista.....	163
5.2	Bondat d'ajust de l'UBEM-determinista i comparativa amb l'UBEM-híbrid	165
5.3	Síntesi de la validació de la metodologia híbrida.....	176
6	Conclusions	181
6.1	Conclusions generals.....	182
6.2	Aportacions associades al cas d'estudi	185
6.3	Línies de desenvolupament futur	188
6.4	Referències.....	190
Annex A	Glossari d'acrònims	191
Annex B	Càlcul dels WWR.....	193
Annex C	Enquesta energètica	199
Annex D	Càlcul de les infiltracions	201
Annex E	Respostes de l'enquesta ECEER.....	205
Annex F	Informació aparells elèctrics	241
Annex G	Càlcul del coeficient d'ajust de la temperatura de l'aigua de xarxa	243
Annex H	Publicacions científiques	245

1 INTRODUCCIÓ

El canvi climàtic és un dels majors reptes de l'època actual del qual l'espècie humana n'és principal causant i víctima alhora. Per tal de poder mitigar els principals efectes d'aquest i evitar-ne les conseqüències més greus, la Unió Europea (UE) va aprovar l'any 2020 el *Green Deal* que consisteix en un full de ruta per convertir Europa en el primer continent climàticament neutre l'any 2050 (Buckley et al., 2021). L'assoliment d'aquest objectiu requereix de l'aplicació de diverses estratègies com la inversió en tecnologies verdes, la innovació industrial, la descarbonització tant del transport com de l'energia, així com la millora de l'eficiència energètica del parc edificat, entre altres.

Mentre les emissions dels gasos d'efecte hivernacle (GEH) provinents de sectors com la indústria o el transport varien significativament entre ciutats, les emissions relacionades amb el sector de l'edificació tenen sempre una significança important (Cerezo Davila et al., 2016). El sector de l'edificació s'ha convertit a hores d'ara en un punt clau per a les polítiques i estratègies de transició energètica així com de reducció d'emissions de GEH. Malauradament, la preocupació per la crisi econòmica i financera internacional dels darrers anys, així com l'encara recent crisi sanitària derivada de la Covid-19, han desviat l'atenció general de les polítiques lluny de la política energètica, i ha limitat la seva capacitat d'intervenció, cosa que no afavoreix la consecució dels objectius en matèria de canvi climàtic. En l'actualitat, els problemes de seguretat energètica deguts, entre d'altres, a la gran dependència dels combustibles fòssils, i accentuats arrel de la guerra entre Rússia i Ucraïna, ha tornat a posar en primer pla la necessitat urgent d'avançar en la transició energètica.

Les polítiques adoptades fins a dia d'avui en el sector de l'edificació, sobretot les referents als aspectes energètics d'aquest, no han permès extraure tot el potencial d'aquest sector. Una de les principals causes és que fins fa relativament poc la majoria de les directives i reglaments es centraven principalment en els edificis de nova construcció tenint menys en compte els amplis estocs d'edificis existents, i que representen la immensa majoria de l'actual i futur parc edificat. En la UE, la rehabilitació del parc edificat existent s'ha convertit a hores d'ara en un dels punts claus en el sector de l'edificació. Tanmateix, aquest és un procés complex que implica l'anàlisi de múltiples interaccions entre els components de l'edifici així com del seu entorn (Panagiotidou et al., 2021).

Cada vegada hi ha més consens en que els models energètics a escala urbana, més coneguts com a UBEM, de l'anglès *Urban Building Energy Model*, esdevinguin una de les

eines clau en la presa de decisions en l'àmbit de la rehabilitació energètica dels edificis, tot i que perquè siguin reconegudes com una eina fiable encara han de superar diversos reptes entre els quals es destaca el desajust entre els resultats dels models i les dades d'ús d'energia mesurades (Reinhart & Cerezo Davila, 2016).

La present tesi doctoral, realitzada en col·laboració amb Andorra Recerca + Innovació^{1.1} (ARI), planteja una metodologia alternativa en la fase de caracterització dels UBEM que incorpora l'ús de les dades dels consums elèctrics mesurats de tot el parc edificat. L'enfocament proposat pretén reduir els desajustos habituals entre les simulacions i les dades reals d'ús d'energia mesurades. La seva validesa s'estudia en aquesta tesi a través d'un cas d'estudi a Escaldes-Engordany (Principat d'Andorra).

1.1 L'edificació. Un nínxol per explotar en el camí de la transició energètica

1.1.1 Perspectiva actual i futura del sector

Durant les darreres dècades s'ha experimentat una expansió urbana sense precedents degut principalment a l'important augment de la població, així com de la forta migració d'aquesta cap a les ciutats (Nacions Unides, 2015). Des de 1950, s'ha produït un enorme augment arreu del món del percentatge de població vivint en les ciutats, i des de l'any 2008 per primera vegada en la història de la humanitat, més del 50% de la població mundial viu en elles (Nacions Unides, 2014). Lluny de que aquesta tendència disminueixi o s'estabilitzi, les projeccions de les Nacions Unides preveuen que aquesta xifra augmenti fins al 68% l'any 2050 amb l'arribada de prop de 2,5 bilions de persones a les ciutats (Nacions Unides, 2018). Es calcula que per donar cabuda als futurs urbanites, al parc edificat actual s'afegiran 230 000 milions de metres quadrats d'aquí a l'any 2060 (Nacions Unides, 2021b). Mentre aquesta ràpida urbanització motiva el desenvolupament econòmic i social, també condueix a un augment considerable del consum d'energia i de les emissions de GEH (W. Li et al., 2017).

Les zones urbanes, ocupant el 2% de la superfície terrestre, són responsables del 78% del consum d'energia mundial així com de més del 60% de les emissions de CO₂ (Nacions Unides, 2021a), tanmateix aquest sector també presenta un important potencial de reducció. La Figura 1.1 mostra l'històric de les emissions de GEH del 1990 fins al 2019, així com els 5

^{1.1} <https://ari.ad/>

escenaris fins l'any 2050 avaluats pel GTIII AR6 (*Working Group III sixth Assessment Report*) en l'últim informe de l'IPCC (2022). En aquesta s'aprecia com tots els escenaris analitzats preveuen una important reducció de les emissions del parc edificat mundial d'aquí a l'any 2050 exceptuant l'escenari basat en el panorama polític actual. En conseqüència, el sector de l'edificació és un dels eixos prioritaris en la política energètica actual del qual s'espera que tingui un paper fonamental en la reducció de GEH.

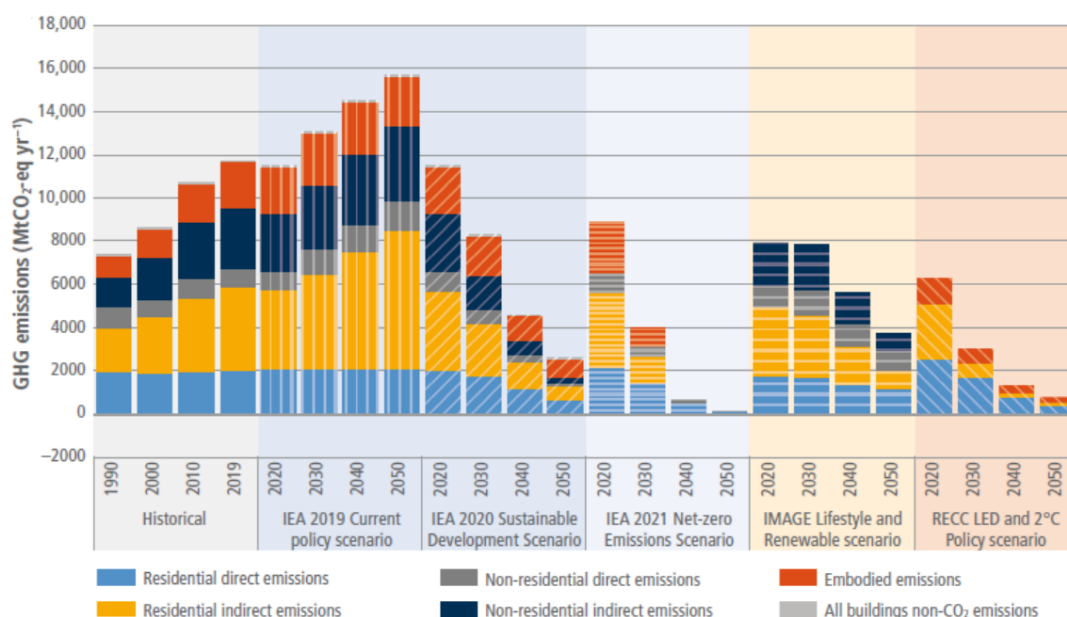


Figura 1.1. Emissions històriques de GEH del sector de l'edificació i projeccions futures basades en 5 escenaris

Font. IPCC (2022)

El parc edificat existent arreu del món és ampli, heterogeni, i es compona majoritàriament per edificis de característiques energètiques deficientes (Ballarini et al., 2014), sobretot si es compara amb les exigències mínimes de les normatives i reglaments en vigor sobre eficiència energètica aprovats en moltes ciutats. Dominat pel sector residencial que cobreix el 75% de la superfície total construïda (Panagiotidou et al., 2021) i sent responsable de més de la meitat de les emissions del sector de l'edificació (veure Figura 1.1), es calcula que el 80% del parc edificat mundial seguirà en ús l'any 2050 (Buckley et al., 2021), pel que la rehabilitació dels edificis, i especialment dels edificis residencials, centrarà bona part de les accions en els propers anys.

L'interès en la rehabilitació energètica dels edificis ha augmentat globalment durant els darrers anys, però sens dubte l'UE és la regió més activament implicada en especial des de l'aprovació de la Directiva 2002/91/EC i les subsegüents (2010/31/EU; 2012/27/EU; 2018/844),

relatives al rendiment energètic dels edificis. Malauradament, tot i l'esforç normatiu, l'actual xifra de renovació de l'1% anual no és suficient per assolir els objectius de neutralitat carboni previstos per l'any 2050 (Buckley et al., 2021).

Segons Ballarini, Corgnati, & Corrado (2014), una de les principals causes dels pocs avenços en matèria d'eficiència energètica de les edificacions existents és que la majoria d'accions que s'han dut a terme són aïllades i poc significatives, per tant insuficients per assolir els objectius de reducció definits per la UE. Per aquest motiu, és necessari que es posin en marxa plans d'acció integrals a nivell nacional o regional que redueixin significativament tant el consum d'energia com les emissions de CO₂ provinents del sector de l'edificació.

Una de les estratègies més adoptades per governs i institucions per reduir el consum energètic del parc edificat són els programes d'incentius econòmics mitjançant sistemes d'ajuts públics per facilitar les millores energètiques del parc edificat (Chen et al., 2017a). Un dels problemes d'aquest tipus de programes és que abasteixen una gran quantitat de mesures d'estalvi energètic, que malgrat millorin el comportament energètic dels edificis, és complicat conèixer-ne la seva eficàcia. En aquest sentit, els responsables polítics, així com els diferents actors implicats en la gestió de l'energia de les ciutats, requereixen d'eines per comprendre, amb un cert nivell de detall, on i com es consumeix l'energia, com variarà l'ús d'aquesta amb l'aplicació de les diferents mesures d'estalvi, així com quin és el seu cost associat.

Per poder reduir notablement el consum d'energia i les emissions, tant en edificis existents com de nova construcció, les ciutats necessiten d'una millor comprensió, no només del sector i els edificis amb un ús més intensiu d'energia, sinó també de quins efectes futurs podrien tenir els programes integrals de reconversió energètica i els canvis en la infraestructura de subministrament d'energia (Cerezo Davila et al., 2016).

L'interès en l'anàlisi dels amplis estocs d'edificis ha augmentat considerablement durant les darreres dècades però la gran complexitat i interrelació de les característiques que afecten al comportament energètic dels edificis, requereix d'eines que permetin l'avaluació de l'estat actual dels edificis, així com dels impactes tecno-econòmics de les possibles estratègies d'eficiència energètica i energies renovables que es pretenen posar en marxa (Swan & Ugursal, 2009). En aquest sentit, els models energètics s'han posicionat com una de les eines més prometedores. Segons Kavgić et al. (2010), la implementació eficient i racional de les estratègies i les polítiques de reducció de les emissions de CO₂ dels amplis estocs d'edificis requereixen de la implementació de models que tinguin la capacitat (a) d'estimar el consum base del parc edificat existent, (b) explorar efectes, tant tècnics com econòmics, de les possibles estratègies de reducció del consum energètic al llarg del temps, incloent l'impacte

de les noves tecnologies, i (c) d'identificar els efectes de les estratègies de reducció en la qualitat de l'ambient interior.

1.1.2 Els models energètics urbans com a eina de suport a la presa de decisions

Al llarg de les darreres dècades, la modelització i simulació dels edificis així com dels seus sistemes energètics ha estat àmpliament utilitzada per a la planificació, demostració i avaluació de mesures d'estalvi energètic i la millora del confort tèrmic dels edificis individuals mitjançant l'ús de BEM, de l'anglès *Building Energy Models*. No obstant, la interacció dels edificis amb els edificis circumdants i l'entorn urbà, així com la cada vegada més freqüent implementació dels sistemes energètics urbans, com les xarxes de calor o fred, han provocat que l'atenció de les modelitzacions dels edificis individuals es desplaci envers modelitzacions a escala urbana (Johari et al., 2020). Més coneguts sota les sigles UBEM, els models a escala urbana han guanyat popularitat al llarg de la darrera dècada, i una clara prova d'aquest fet és l'important augment de les publicacions dels darrers anys en aquest camp d'estudi, sobretot a partir del 2016, tal com mostra la Figura 1.2.

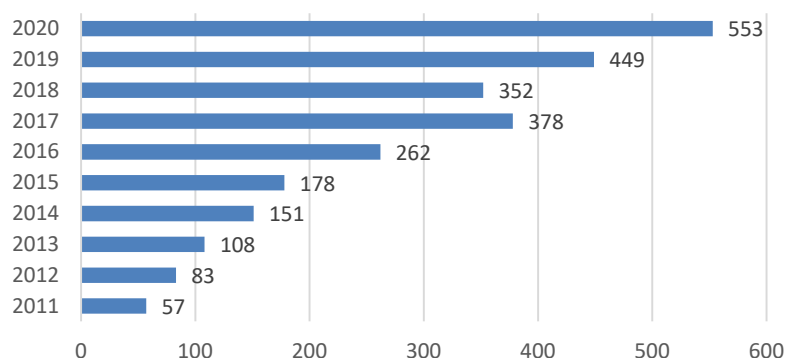


Figura 1.2. Nombre de publicacions en el camp d'estudi dels UBEM entre 2011-2020

Font. Malhotra et al. (2022)

Fins a dia d'avui s'han desenvolupat una gran quantitat de mètodes i eines per a analitzar els amplis estocs d'edificis, així com per a comprendre els patrons de demanda i consum energètic del sector de l'edificació, que es diferencien entre elles en termes de dades requerides i del nivell d'agregació d'aquestes (Kavgic et al., 2010). La Figura 1.3 presenta la classificació més recent dels diferents UBEM desenvolupats fins a l'actualitat realitzada per Ferrando et al. (2020). Aquesta agrupa els diferents mètodes i aproximacions en dues categories: les *top-down* i les *bottom-up*.

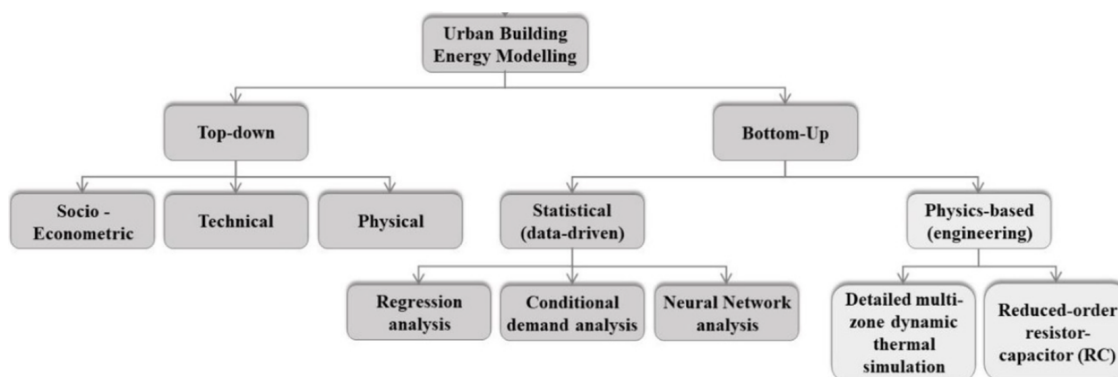


Figura 1.3. Classificació de les tècniques existents per a la modelització urbana comportament energètic del sector de l'edificació

Font. Ferrando et al. (2020)

Les aproximacions *top-down* tracten el sector de l'edificació com un únic conjunt d'energia sense diferenciar entre els possibles consums finals. Aquestes no necessiten dades específiques de cada edifici, sinó que estimen el consum energètic d'aquests a partir de l'anàlisi de les relacions a llarg termini que vinculen l'energia utilitzada pels edificis amb determinats factors. La naturalesa d'aquests factors divideix aquesta categoria de models en tres subcategories: (1) socio-econòmics (Bentzen & Engsted, 2001; Van Vuuren et al., 2009), (2) tècnics (Huo et al., 2019; Norman et al., 2006), i (3) físics (Kavgic et al., 2010; Zhang, 2004). Les aproximacions *top-down* requereixen de menys dades d'entrada i serveixen principalment per preveure un futur pròxim del consum d'energia mitjançant l'extrapolació de l'*status quo*. Al basar-se en tendències passades, aquestes no tenen la capacitat de predir intrínsecament tendències futures. A més, els seus resultats consisteixen generalment en dades agregades i sense detall espacial, pel que són limitats a l'hora d'explorar noves tecnologies o analitzar intervencions en què es vulguin caracteritzar les exigències energètiques a escala d'edifici.

D'altra banda, els enfocaments *bottom-up* es basen en el càlcul del consum energètic a escala d'edifici, que pot ser agregat posteriorment en el marc d'un anàlisi integrat del parc edificat. Tot i requerir d'una major quantitat de dades, a més de desagregades per poder caracteritzar cadascun dels aspectes tèrmics dels edificis, així com de majors recursos computacionals si es comparen amb els models *top-down*, els models *bottom-up* tenen la capacitat d'identificar estratègies i mesures d'estalvi a escala urbana i d'edifici. En funció del mètode utilitzat per a calcular el consum energètic es poden distingir dos enfocaments diferents. Els models estadístics o *data-driven*, que utilitzen tècniques de *data mining* i *machine learning* per avaluar el consum energètic dels edificis (Kontokosta & Tull, 2015; Mastrucci et al., 2014), i els models basats en la física o d'enginyeria, en els quals el propi model,

conjuntament amb una eina de simulació, calcula el consum energètic dels edificis a través de la caracterització detallada de les diferents propietats tèrmiques d'aquests (Stephan et al., 2013). Els models estadístics són robustos ja que estan basats en dades energètiques detallades i, per tant, tenen la capacitat d'incorporar el comportament dels ocupants amb exactitud en el model, tanmateix no tenen la capacitat de predir l'ús d'energia a nivell mensual o horari, ni de simular l'impacte de l'aplicació de mesures d'eficiència energètica en els edificis. Contràriament a aquests, els models físics tenen la capacitat d'estimar l'ús d'energia a nivell mensual o horari, així com de simular l'impacte de l'aplicació de mesures d'eficiència energètica en els edificis. Al tenir com a objectiu dissenyar i optimitzar els sistemes energètics urbans i planificar el desenvolupament urbà, els resultats d'aquests es caracteritzen per un major detall espacio-temporal en comparació a altres mètodes (Happle et al., 2018).

Tot i l'existència de nombroses aproximacions per analitzar el comportament dels edificis, els models *bottom-up* basats en la física són a dia d'avui els més utilitzats, principalment per la seva resolució temporal (W. Li et al., 2017), i han estat proposats com una eina efectiva de simulació urbana capaç d'incorporar diferents conjunts de dades sobre el parc edificat així com els factors externs que l'afecten. Alhora permeten mapejar l'ecosistema energètic d'una ciutat amb l'objectiu de tenir un major coneixement dels perfils energètics actuals dels edificis que componen el parc edificat i abordar futurs potencials d'estalvi energètic i reduccions d'emissions de CO₂ mitjançant l'adaptació d'estratègies a escala urbana.

Els UBEM basats en la física es basen en models de simulació físics de fluxos de calor i massa a l'interior i al voltant dels edificis. Poden ser tant estàtics com dinàmics, són capaços de representar l'impacte del context urbà sobre la demanda energètica dels edificis i tenen la capacitat d'anar més enllà dels models urbans estadístics tradicionals, podent arribar a estimar els impactes de les noves tecnologies i/o les polítiques de les quals no es disposen de dades mesurades (Cerezo Davila et al., 2016).

Aquests models es basen en els mateixos principis i equacions de transferència de calor que utilitzen els BEM, àmpliament utilitzats avui en dia per al disseny d'edificis eficients, pel compliment de les normatives energètiques o també per a l'obtenció de certificacions de sistemes de qualificació (Cerezo Davila et al., 2016), com per exemple la certificació LEED^{1.2} als Estats Units, BREEAM^{1.3} a Anglaterra o la *Certificación Verde*^{1.4} a Espanya. Aquestes

^{1.2} <https://www.usgbc.org/leed>

^{1.3} <https://tools.breeam.com/projects/index.jsp>

^{1.4} <https://gbce.es/certificacion-verde/>

modelitzacions a nivell individual podrien, en principi, ser aplicables a qualsevol quantitat d'edificis però això requeriria d'una gran quantitat de recursos, tant econòmics com temporals. Per aquest motiu, s'ha ampliat l'abast dels BEM cap a l'àmbit urbà sent així més rellevants i assequibles. Aquest procés ha requerit d'una re-conceptualització i automatització dels fluxos dels BEM fins arribar als UBEM que tot i haver demostrat ja la seva eficàcia en estudis energètics detallats com en el cas del generat a Boston (Cerezo Davila et al., 2016), o a San Francisco (Chen et al., 2017a), per a que siguin reconeguts com una eina fiable per a la planificació urbana encara han d'assolir diversos reptes.

Una de les principals preocupacions i focus d'interès en el camp d'estudi dels UBEM és el desajust entre els resultats de les simulacions i el consum energètic real dels edificis (De Wilde, 2014). Els valors reportats d'aquest desajust conegut com *the performance gap*, tendeixen a la mitjana quan s'analitzen en resolucions espacials i temporals agregades podent arribar a valors d'1%, no obstant, quan s'analitzen a escales més desagregades, tant a nivell espacial com temporal, els errors poden arribar a valors del 1000% (Oraiopoulos & Howard, 2022). Aquests desajustos són una barrera important per poder fonamentar decisions polítiques en base als resultats dels UBEM.

La re-conceptualització dels BEM en UBEM ha comportat forçosament una sèrie d'assumpcions i simplificacions de les diferents dades necessàries per a la implementació dels UBEM que inevitablement aporten incerteses difícilment quantificables, i difícils de gestionar (Ferrando et al., 2020). Segons Cerezo Davila et al. (2016), la major incertesa persistent en el camp d'estudi dels UBEM està relacionada amb la constitució i posterior descripció detallada dels arquetips utilitzats per representar l'ampli i heterogeni estoc d'edificis. Mentre que la recopilació de la gran quantitat de dades necessàries per definir detalladament els aspectes que afecten al comportament energètic dels edificis és realitzable per un o uns pocs edificis, aquesta tasca esdevé molt àrdua per grans extensions d'edificis a escala urbana. Per aquest motiu, els UBEM requereixen de l'aplicació de la metodologia arquetip que consisteix en una divisió del parc edificat en subgrups homogenis d'edificis representats per un o varis edificis anomenats arquetips dels quals s'obtenen les dades.

La metodologia arquetip ha rebut molta atenció recentment i ha estat objecte de nombrosos treballs de recerca pel seu gran impacte en els resultats de les simulacions (Pasichnyi et al., 2019). No obstant, la majoria d'aquests es centren en la millora de les propietats no-geomètriques utilitzades per definir els edificis mitjançant tècniques de calibratge (Sokol et al., 2017) fins l'obtenció dels valors òptims per cadascuna d'elles, deixant de banda la fase prèvia de fragmentació del parc edificat. A dia d'avui no existeix una metodologia estàndard per definir arquetips representatius del parc edificat, i generalment s'aplica la metodologia determinista que utilitza l'ús dels edificis i els anys de construcció

com a variables. La millora en aquesta fase es considera com un dels majors reptes dels UBEM, i els algorismes de *machine learning* estan considerats un dels enfocaments més prometedors per fer-ho (Johari et al., 2020), tot i que la precisió d'aquest també dependrà del tipus i la qualitat de les dades utilitzades per classificar el parc edificat. En aquest sentit, Cerezo Davila et al. (2016) destaquen que l'accés a dades d'ús d'energia mesurades obriria la porta a millorar la fragmentació del parc edificat a través de generar els arquetips en base a dades empíriques. Malauradament, l'accés a aquestes dades acostuma a ser limitat degut a les estrictes polítiques de confidencialitat de les companyies energètiques.

1.1.3 El Principat d'Andorra, l'oportunitat d'implementar un UBEM amb dades de consum d'energia

El Principat d'Andorra, zona d'estudi d'aquesta tesi, s'ubica als Pirineus entre França i Espanya, té una població aproximada de 80 000 habitants i una superfície de 468 km². Des d'un punt de vista climàtic, Andorra té un clima mediterrani d'alta muntanya, d'acord amb les grans diferències d'altitud existents al país (Sant Julià de Lòria, el poble més baix, està situat a 940 msnm, i Soldeu, el més alt, a 1 825 msnm). La diversitat de les formes del relleu, l'orientació diferent de les valls i la irregularitat típica dels climes d'influència mediterrània fan que el país tingui una gran diversitat de microclimes, que matisen el domini general del clima d'alta muntanya. La Figura 1.4 mostra els principals aspectes físics del Principat d'Andorra. Hi destaquen les diferències d'altitud sobretot entre la zona nord i sud, però també entre el fons de vall on es situen els assentaments urbans i les zones més elevades en el contorn exterior del país.

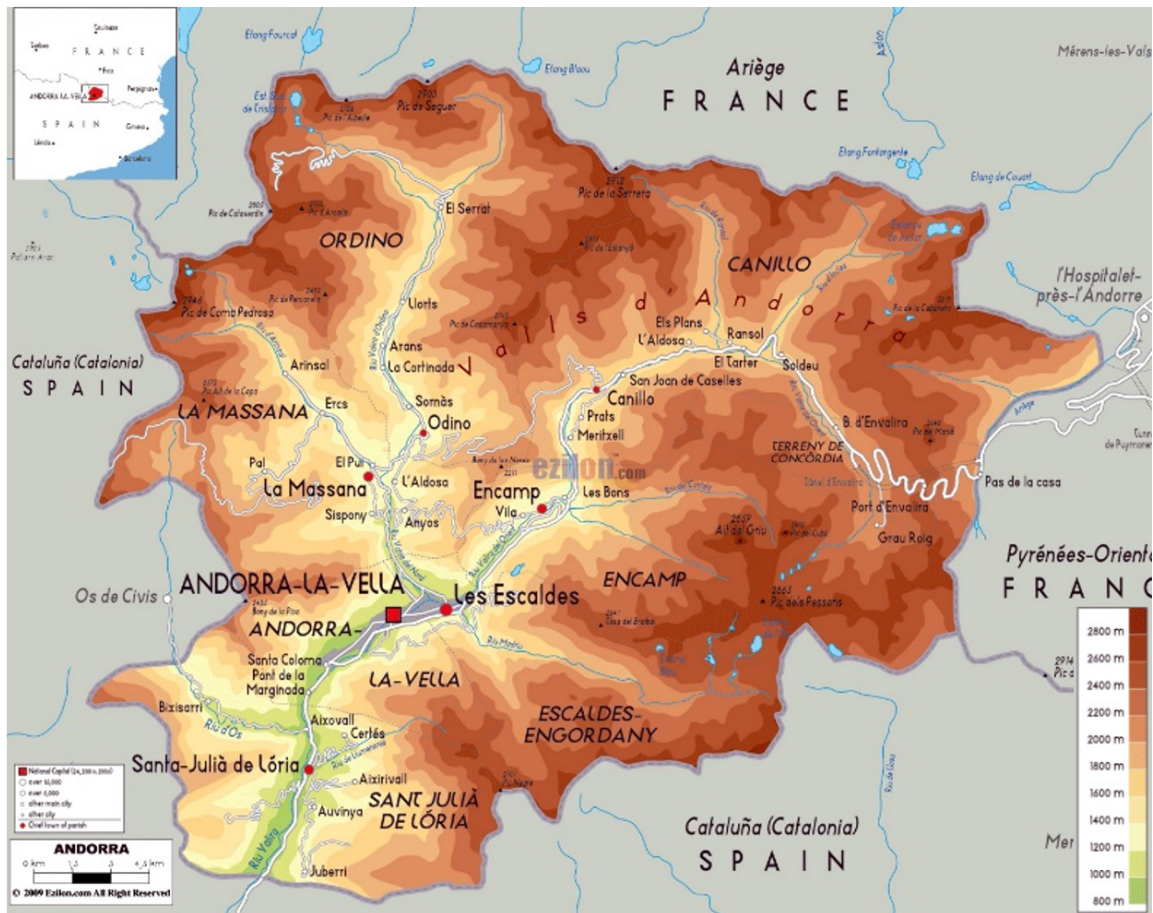


Figura 1.4. Cartografia física del Principat d'Andorra

Font. Ezilon (2015)

El seu sistema energètic es caracteritza per una dependència energètica de l'exterior superior al 90%, s'importa el 80% de l'energia elèctrica i el 100% dels combustibles fòssils (OECC, 2021). Aquest i altres factors, com el continu creixement de la demanda energètica, el risc de saturació de les línies d'importació elèctrica, l'encariment constant dels carburants i les tarifes elèctriques, i la voluntat del compliment de les directrius energètiques europees, van motivar l'elaboració del Pla Estratègic de l'Energia 2006 – 2015 (Govern d'Andorra, 2007). En aquest pla es van traçar les primeres línies i objectius estratègics del país en matèria d'energia fins l'any 2015, les quals es van actualitzar posteriorment al Llibre Blanc de l'Energia (Govern d'Andorra, 2012).

Més recentment, la Llei 21/2018, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc) va dibuixar el futur energètic del país, així com el camí a seguir per tal d'assolir els compromisos climàtics. En aquest camp, Andorra s'ha compromès en reduir les seves

emissions de GEH en un 37% l'any 2030 respecte l'escenari de referència i, en línia amb els països de la UE, a assolir la neutralitat carboni l'any 2050 (Govern d'Andorra, 2020).

De la totalitat de les emissions de GEH generades, s'estima que un 56% són degudes a la mobilitat, un 23% al sector de l'edificació i un 17% a la generació d'electricitat i calor. El 4% restant correspon a altres sectors com la indústria, l'agricultura i la ramaderia. D'altra banda, l'absorció d'emissions de GEH a través de la massa forestal del país, s'estima en 140 GgCO₂/any, el 23% de les emissions generades (OECC, 2021).

Tal com estableix la Litecc, la disminució de la demanda d'energia, la implantació de sistemes més eficients i la producció d'energies renovables són els pilars del futur model energètic per potenciar la seguretat energètica, la sobirania nacional i impulsar la mitigació del canvi climàtic. Pel que fa al sector de l'edificació, l'Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic (OECC, 2021) imposa com a objectiu la reducció del 40% del consum energètic del sector l'any 2030 i assolir la descarbonització l'any 2050. La implantació de mesures d'estalvi i eficiència energètica complementades amb la introducció d'energies renovables són les principals accions identificades per assolir els objectius fixats. Per al parc immobiliari de nova implantació es pretén que els edificis tinguin un consum d'energia gairebé nul i incorporin un percentatge mínim de producció energètica in situ a partir de fonts renovables. De totes formes, tal com assenyala l'OECC (2021), el gran repte serà renovar i rehabilitar energèticament el parc existent, pel que proposa mantenir i millorar-ne l'impuls a través de programes d'ajuda o bé de sistemes de finançament preferencial.

En l'única modelització del sistema energètic a escala de país realitzada fins a data d'avui, Travesset-Baro (2017) estima que el sector residencial representava l'any 2015 el 14% del consum d'energia final del país i, tot i les mesures d'eficiència aportades pel Reglament energètic de l'edificació (BOPA 57/2010), en preveia un increment del 32% en l'escenari de referència l'any 2050 vinculat principalment al creixement de la població. Tot i que aquesta projecció no tenia en compte l'obligació imposada per la Litecc de que els edificis de nova construcció a partir de l'any 2020 han de tenir un consum d'energia quasi nul, dona una aproximació del repte que ha d'afrontar el país, i el sector de l'edificació en especial, per assolir els objectius als que s'ha compromès.

El cas d'estudi d'aquesta tesi es centra a Escaldes-Engordany, una ciutat de 14 917 habitants segons el cens de l'any 2022, i la setena parròquia d'Andorra, creada el 1978 a partir de l'antic quart homònim de la parròquia d'Andorra la Vella. Segons la caracterització del parc edificat realitzada per Borges (2016), aquest es compon de poc més de 1 000 edificis destinats majoritàriament a usos mixtos i residencials. En destaca també que bona part del

parc està format per edificis de més de 25 anys (veure Figura 1.5) amb comportaments energètics deficients.

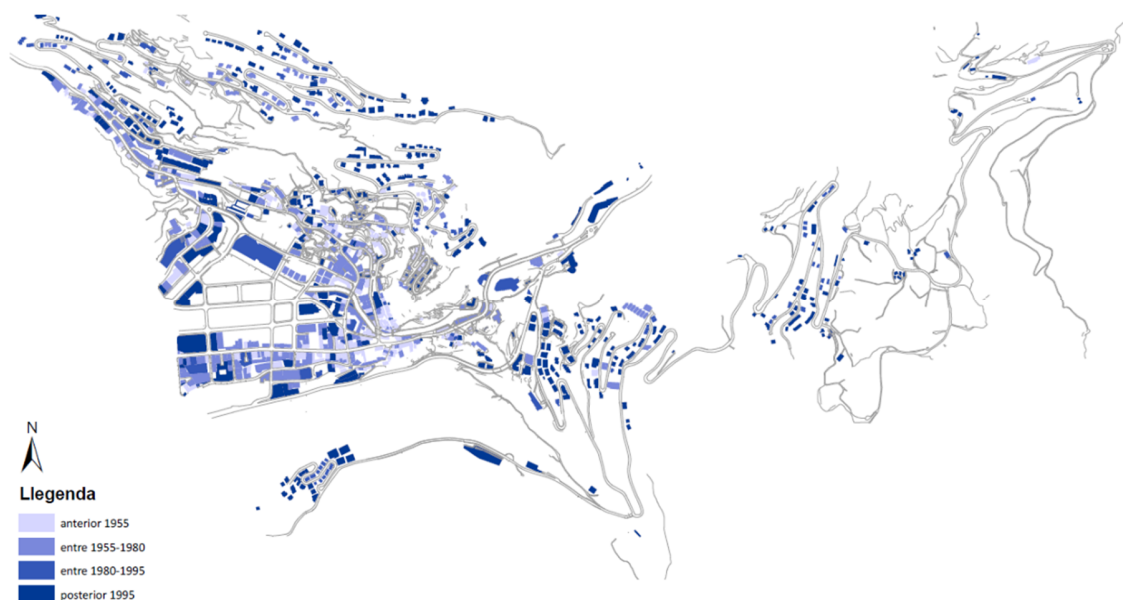


Figura 1.5. Classificació del parc edificat d'Escaldes-Engordany segons època constructiva

Font. Borges (2016)

Entre les línies de treball futures identificades en la tesina final de màster, Borges (2016) destaca el potencial de l'ús de dades mesurades de consums d'energia per millorar la caracterització del parc edificat i, concretament la identificació d'arquetips representatius.

La present tesi doctoral aprofundeix en aquesta línia de treball gràcies a poder disposar de les dades mensuals d'ús d'electricitat de tot el parc edificat d'Escaldes-Engordany. Això ha estat possible gràcies a la col·laboració entre Andorra Recerca + Innovació (ARI) i Forces Elèctriques d'Andorra (FEDA), operadora del sistema elèctric andorrà, i distribuïdora-comercialitzadora única de la parròquia d'Escaldes-Engordany.

1.2 Objectius de la tesi

1.2.1 Objectiu general

L'objectiu general d'aquesta tesi doctoral és la definició i implementació d'una metodologia de fragmentació del parc edificat que redueixi el desajust entre els resultats dels UBEM i les dades d'ús d'energia mesurades. Aquest objectiu s'emmarca dins d'un altre de més ampli, el de contribuir a la transició energètica efectiva de les zones urbanes.

1.2.2 Objectius específics

L'objectiu general es desglossa en els objectius específics següents:

- Realitzar una revisió bibliogràfica exhaustiva dels UBEM, les principals metodologies emprades en la seva implementació, les seves aplicacions així com les eines base d'implementació.
- Definir la metodologia de fragmentació del parc edificat utilitzant dades d'ús d'energia mesurades desagregades.
- Implementar la metodologia de fragmentació del parc edificat al cas d'estudi d'Escaldes-Engordany.
 - Caracteritzar el parc edificat d'Escaldes-Engordany recopilant les dades disponibles i generant les inexistentes.
 - Seleccionar l'eina de generació que s'adeqüi a la tipologia i disponibilitat de les dades del cas d'estudi.
 - Generar l'UBEM d'Escaldes-Engordany.
 - Simular el consum energètic dels edificis residencials a escala de planta.
- Validar la metodologia proposada.
 - Determinar la bondat d'ajust de l'UBEM d'Escaldes-Engordany mitjançant dades d'ús d'energia mesurades.
 - Comparar l'ajust dels resultats de l'UBEM implementat utilitzant la metodologia de fragmentació proposada respecte haver utilitzat la tradicional fragmentació determinista.

1.3 Metodologia general i estructura de la tesi

L'eix central de la tesi doctoral consisteix en el desenvolupament d'una metodologia per la fragmentació del parc edificat utilitzant dades d'ús d'energia mesurades per la identificació d'arquetips representatius. La validació de l'enfocament es realitza a través d'un cas d'estudi a la parròquia d'Escaldes-Engordany, mitjançant la implementació d'un UBEM dels edificis residencials.

En la implementació de l'UBEM s'ha seguit, de forma general, la metodologia descrita per Cerezo Davila et al. (2016), la qual es divideix en tres etapes: (1) caracterització, (2) generació, i (3) simulació i validació. Cadascuna d'aquestes etapes es descriuen en els tres capítols posteriors a aquest, i s'hi exposen detalladament els processos realitzats així com l'estat de l'art de cada una de les fases. La Figura 1.6 presenta l'esquema detallat de la implementació de la metodologia en l'UBEM d'Escaldes-Engordany.

La fase de caracterització, presentada al Capítol 2, és el punt de partida en la construcció d'un UBEM i és la més important i laboriosa de tot el procés ja que consisteix en la recopilació, tractament i organització de totes les dades i informació necessàries per a la implementació del model. Aquestes es divideixen en tres tipus: (1) informació climàtica, (2) geometria dels edificis i del seu entorn, i (3) propietats no-geomètriques. Tota aquesta informació s'extreu habitualment de bases de dades existents, normatives i documents tècnics, així com de treballs previs i de literatura existent. En el cas de l'UBEM d'Escaldes-Engordany també s'ha realitzat una enquesta energètica per tal d'obtenir algunes dades mancants. En aquest Capítol es presenta detalladament la nova metodologia proposada per la fragmentació del parc edificat.

A continuació, el Capítol 3 detalla la fase de generació de l'UBEM que consisteix en combinar totes les dades en un model energètic mitjançant una eina de generació, així com en la definició de les diferents zones tèrmiques que compondran el model. L'eina utilitzada en l'UBEM d'Escaldes-Engordany és l'ArchSim Energy Modeling (Dogan, 2013) i les zones tèrmiques es defineixen a escala de planta dels edificis.

Seguidament, el Capítol 4 es centra en la fase de simulació i validació del model. Un cop generat el model, caracteritzades totes les zones tèrmiques que el componen, i afegida la informació climàtica, es realitza la simulació. En l'UBEM d'Escaldes-Engordany el motor de càlcul utilitzat és EnergyPlus (DOE, 2018). Posteriorment, per poder determinar la bondat d'ajust dels resultats obtinguts aquests s'han comparat amb dades de consum d'energia.

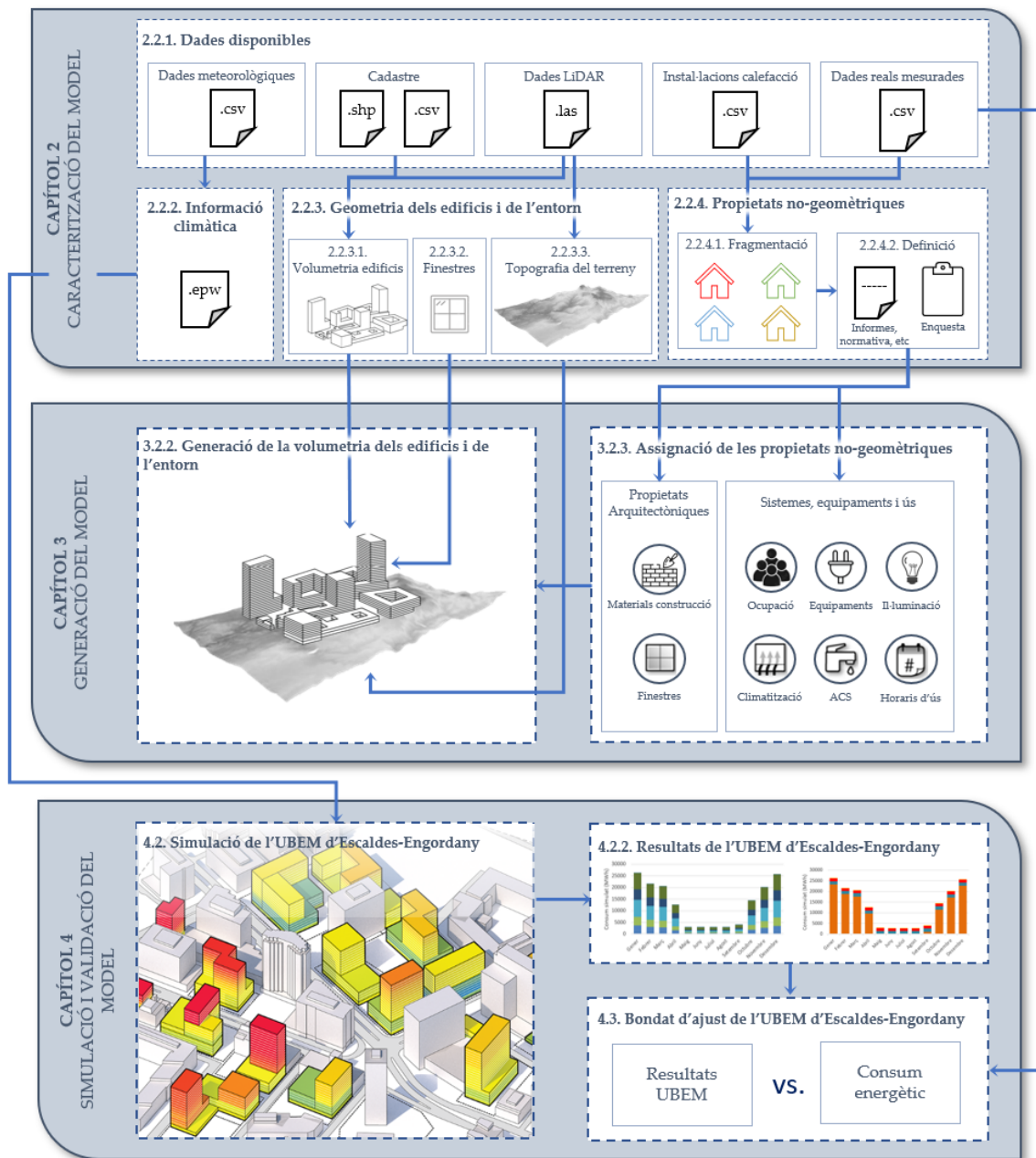


Figura 1.6. Etapes d'implementació de l'UBEM i correspondència amb els capítols i seccions de la tesi

Font. Elaboració pròpia

A més d'implementar l'UBEM amb la nova metodologia de fragmentació, en el Capítol 5 s'implementa un segon UBEM utilitzant l'habitual metodologia de fragmentació

determinista per valorar la idoneïtat de la metodologia proposada comparant els resultats obtinguts d'aquesta amb el model anterior.

Finalment, en el Capítol 6 s'exposen les conclusions, així com les principals línies de treball futures de la present tesi doctoral.

1.4 Referències

- 2002/91/EC. (2002). *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 6 December 2002 on the Energy Performance of Buildings*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0071:EN:PDF>
- 2010/31/EU. (2010). *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:en:PDF>
- 2012/27/EU. (2012). *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/EC*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>
- 2018/844. (2018). *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*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>
- Ballarini, I., Corgnati, S. P., & Corrado, V. (2014). Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. *Energy Policy*, 68, 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.027>
- Bentzen, J., & Engsted, T. (2001). A revival of the autoregressive distributed lag model in estimating energy demand relationships. *Energy*, 26(1), 45–55. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(00\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(00)00052-9)
- BOPA 57/2010. (2010). *Decret d'aprovació del Reglament Energètic en l'edificació*. www.bopa.ad.
- Borges, P. (2016). *Canvi climàtic i consums energètics del parc edificat a Andorra: el cas d'Escaldes-Engordany*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Buckley, N., Mills, G., Reinhart, C., & Berzolla, Z. M. (2021). Using urban building energy modelling (UBEM) to support the new European Union's Green Deal: Case study of Dublin Ireland. *Energy and Buildings*, 247, 111115. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111115>

- Cerezo Davila, C., Reinhart, C. F., & Bemis, J. L. (2016). Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets. *Energy*, *117*, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.057>
- Chen, Y., Hong, T., & Piette, M. A. (2017). Automatic generation and simulation of urban building energy models based on city datasets for city-scale building retrofit analysis. *Applied Energy*, *205*(July), 323–335. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.128>
- De Wilde, P. (2014). The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. *Automation in Construction*, *41*, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009>
- DOE. (2018). *EnergyPlus Version 8.9.0 Documentation. Auxiliary Programs*.
- Dogan, T. (2013). *ArchSim Energy Modeling*. <https://tkdogan.gitbooks.io/archsim-primer/content/WhatIsThisAbout.html>
- Ezilon. (2015). *Physical map of Andorra*. <https://www.ezilon.com/maps/europe/andorra-physical-maps.html>
- Ferrando, M., Causone, F., Hong, T., & Chen, Y. (2020). Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities and Society*, *62*(July), 102408. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408>
- Govern d'Andorra. (2007). *Pla Estratègic de l'Energia d'Andorra 2006-2015*.
- Govern d'Andorra. (2012). *Llibre Blanc de l'Energia d'Andorra*. http://www.energia.ad/images/stories/portada/LlibreBlanc_2012.pdf
- Govern d'Andorra. (2020). *Contribució Determinada a Nivel Nacional de Andorra*.
- Happle, G., Fonseca, J. A., & Schlueter, A. (2018). A review on occupant behavior in urban building energy models. *Energy and Buildings*, *174*, 276–292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.030>
- Huo, T., Ren, H., & Cai, W. (2019). Estimating urban residential building-related energy consumption and energy intensity in China based on improved building stock turnover model. *Science of the Total Environment*, *650*, 427–437. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.008>
- IPCC. (2022). Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change. In *Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Issue 1).

- Johari, F., Peronato, G., Sadeghian, P., Zhao, X., & Widén, J. (2020). Urban building energy modeling: State of the art and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128(April). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109902>
- Kavgic, M., Mavrogianni, a., Mumovic, D., Summerfield, a., Stevanovic, Z., & Djurovic-Petrovic, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7), 1683–1697. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.021>
- Kontokosta, C. E., & Tull, C. (2015). EnergyViz: Web-Based Eco-Visualization of Urban Energy Use from Building Benchmarking Data. *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, March*, 1405–1412. http://www.see.eng.osaka-u.ac.jp/seeit/icccb2016/Proceedings/Full_Papers/177-278.pdf
- Li, W., Zhou, Y., Cetin, K., Eom, J., Wang, Y., Chen, G., & Zhang, X. (2017). Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Energy*, 141, 2445–2457. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.071>
- Malhotra, A., Bischof, J., Nichersu, A., Häfele, K. H., Exenberger, J., Sood, D., Allan, J., Frisch, J., van Treeck, C., O'Donnell, J., & Schweiger, G. (2022). Information modelling for urban building energy simulation—A taxonomic review. *Building and Environment*, 208(October 2021), 108552. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108552>
- Mastrucci, A., Baume, O., Stazi, F., & Leopold, U. (2014). Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city: A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam. *Energy and Buildings*, 75, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.032>
- Nacions Unides. (2014). World Urbanization Prospects. In *World Urbanization Prospects*. <https://doi.org/10.4054/DemRes.2005.12.9>
- Nacions Unides. (2015). World Population Prospects. In *United Nations* (Vol. 1, Issue 6042). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Nacions Unides. (2018). World Urbanization Prospects. In *Demographic Research* (Vol. 12). <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
- Nacions Unides. (2021a). *Cities and Pollution*. <https://www.un.org/es/climatechange/cities-pollution.shtml>
- Nacions Unides. (2021b). Global Status report for Buildings and Construction. *United Nations Environment Programme*, 59. <https://globalabc.org/resources/publications/2021-global-status-report-buildings-and-construction>

- Norman, J., MacLean, H. L., & Kennedy, C. A. (2006). Comparing High and Low Residential Density: Life-Cycle Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1), 10–21. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9488\(2006\)132:1\(10\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9488(2006)132:1(10))
- OECC. (2021). *Estratègia energètica nacional i de lluita contra el canvi climàtic 2020-2050*.
- Oraiopoulos, A., & Howard, B. (2022). On the accuracy of Urban Building Energy Modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158(March 2021), 111976. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111976>
- Panagiotidou, M., Aye, L., & Rismanchi, B. (2021). Optimisation of multi-residential building retrofit, cost-optimal and net-zero emission targets. *Energy and Buildings*, 252, 111385. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111385>
- Pasichnyi, O., Wallin, J., & Kordas, O. (2019). Data-driven building archetypes for urban building energy modelling. *Energy*, 181, 360–377. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.197>
- Reinhart, C. F., & Cerezo Davila, C. (2016). Urban building energy modeling - A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- Sokol, J., Cerezo Davila, C., & Reinhart, C. F. (2017). Validation of a Bayesian-based method for defining residential archetypes in urban building energy models. *Energy and Buildings*, 134, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.050>
- Stephan, A., Crawford, R. H., & de Myttenaere, K. (2013). Multi-scale life cycle energy analysis of a low-density suburban neighbourhood in Melbourne, Australia. *Building and Environment*, 68, 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.003>
- Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819–1835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>
- Travesset-Baro, O. (2017). *Prospectiva energètica al Principat d'Andorra. Model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Van Vuuren, D. P., Hoogwijk, M., Barker, T., Riahi, K., Boeters, S., Chateau, J., Scricciu, S., van Vliet, J., Masui, T., Blok, K., Blomen, E., & Kram, T. (2009). Comparison of top-down and bottom-up estimates of sectoral and regional greenhouse gas emission reduction potentials. *Energy Policy*, 37(12), 5125–5139. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.024>

Zhang, Q. (2004). Residential energy consumption in China and its comparison with Japan, Canada, and USA. *Energy and Buildings*, 36(12), 1217–1225.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.08.002>

2 CARACTERITZACIÓ DEL MODEL

El Capítol 2 es centra en la fase de caracterització dels UBEM. Primerament, en la secció 2.1 es presenta l'estat de l'art d'aquesta fase inicial del procés d'implementació d'un UBEM detallant la caracterització realitzada en altres UBEM implementats prèviament. La secció 2.2 detalla la caracterització realitzada per l'UBEM d'Escaldes-Engordany, destacant com s'ha superat l'escassetat de dades disponibles a Andorra, així com presentant la nova metodologia de fragmentació del parc edificat. Finalment, el capítol conclou amb la secció 2.3 on es recopilen les variables i paràmetres resultants de la caracterització del model, i que representen la base per a la generació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany.

2.1 Estat de l'art

La caracterització és la fase més complexa de tot el procés d'implementació d'un UBEM, així com la que requereix de més temps. Aquesta consisteix en la recopilació i organització de totes les dades necessàries per a la seva generació. Malauradament, les dades relacionades amb els edificis són sovint escasses, incompletes i de mala qualitat, i fins i tot en alguns casos inaccessibles per diferents motius com ara la protecció de la privacitat, interessos econòmics o barreres tecnològiques (Tardioli et al., 2018).

La caracterització d'un UBEM requereix principalment de tres grans fonts de dades tal i com es mostra en la Figura 2.1, (1) la informació climàtica de la zona d'estudi, (2) la geometria del parc edificat i del seu entorn, i (3) les propietats no-geomètriques dels edificis.

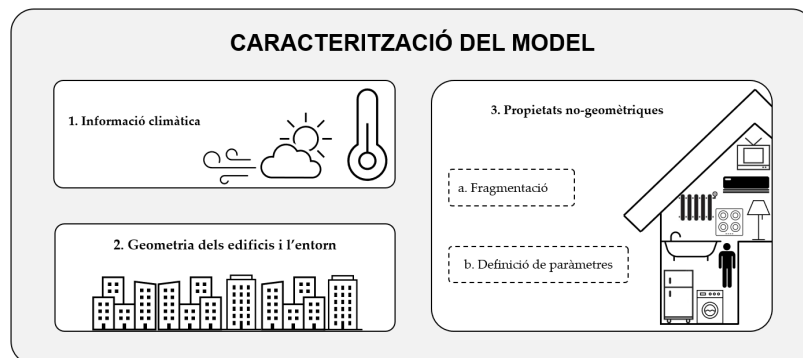


Figura 2.1. Dades necessàries per a la implementació d'un UBEM

Font. Elaboració pròpia

Atesa la gran varietat de dades disponibles, la seva incertesa, el nivell de detall d'aquestes, així com els recursos necessaris per obtenir-les, la gestió de la seva qualitat és un dels principals reptes en la modelització energètica urbana (Nouvel et al., 2017). A continuació es detallen les principals característiques de cadascuna de les dades necessàries per a la generació d'un UBEM, així com les possibles fonts i/o mètodes d'adquisició.

2.1.1 Informació climàtica

Les condicions climàtiques tenen un efecte directe sobre el rendiment energètic dels edificis. Nombrosos estudis destaquen la rellevància de la qualitat de les dades meteorològiques per predir amb precisió la resposta energètica i tèrmica dels edificis, i remarquen la importància que aquestes tinguin en compte fenòmens actuals com el canvi climàtic o l'efecte illa de calor (Zinzi et al., 2018).

Tradicionalment la informació utilitzada per a reflectir les condicions climàtiques exteriors en les simulacions energètiques dels edificis és l'any típic meteorològic, més conegut sota les sigles TMY de l'anglès *Typical Meteorological Year*. Aquests van ser creats pel *National Renewable Energy Laboratory*^{2.1} (NREL) del *U.S. Department of Energy*'s^{2.2} (DOE) com un indicador més localitzat i complet del clima per ajudar en la planificació de la capacitat dels sistemes de climatització (Weather Analytics, 2012)

Els arxius TMY són una recopilació de diferents dades climàtiques representatives per una localitat específica i estructurats en valors horaris per un període d'un any (8 760 hores). Aquests es componen de dotze mesos meteorològics típics (TMM, de l'anglès *Typical Meteorological Months*). La generació d'arxius TMY es realitza a partir de bases de dades meteorològiques plurianuals de les quals es seleccionen com a TMM les dades mensuals que millor representen un determinat mes en base a anàlisis estadístics (J. Sun et al., 2020), d'aquí el seu nom "típic". Una vegada identificats els dotze TMM, aquests són combinats formant un any artificial anomenat TMY. D'aquesta manera s'evita subestimar la variabilitat present en els registres plurianuals que comportaria realitzar una simple mitjana dels registres plurianuals (Honsberg & Bowden, 2019). La Figura 2.2 presenta un exemple teòric de la generació d'un fitxer TMY a partir de TMM.

^{2.1} <https://www.nrel.gov/>

^{2.2} <https://www.energy.gov/>

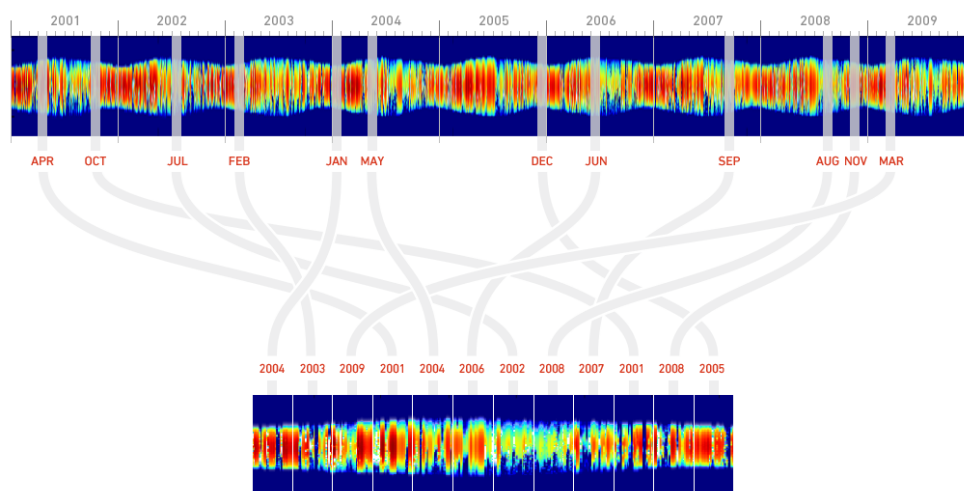


Figura 2.2. Exemple de composició d'un fitxer climàtic TMY

Font. Solargis (2021)

Des que es van generar els primers arxius TMY fins a l'actualitat, la metodologia utilitzada i les variables per a la generació dels fitxers han anat evolucionant. La primera generació de dades meteorològiques TMY es va realitzar l'any 1978 (Hall et al., 1978) i consistia en la selecció de dotze TMM d'un registre plurianual de 30 anys. Aquests dotze TMM es seleccionaven mitjançant l'anàlisi estadístic de nou variables (temperatura seca màxima, mínima i mitjana, punt de rosada, velocitat màxima i mitja del vent, i radiació solar global total) utilitzant diferents factors de ponderació. L'any 1994 va sorgir la segona generació d'arxius TMY, els TMY2 (Marion & Urban, 1995), amb la introducció de la humitat relativa com a nova variable, a més de l'ajustament dels factors de ponderació. La generació d'arxius meteorològics més recent és la TMY3 (H. Li et al., 2021), que tot i no haver patit canvis a nivell de nombre i ponderació de les variables, escurça la sèrie temporal a partir de la qual es seleccionen el TMM, passant aquesta de 30 a 15 anys. No obstant, a dia d'avui no existeix una metodologia estricta per a la selecció dels TMM, sinó que es disposa d'una àmplia varietat d'algoritmes i mètodes que poden ser utilitzats.

Finalment, val a dir que els fitxers TMY3 es van convertir l'any 2010 en el fitxer climàtic predeterminat en l'eina de simulació EnergyPlus. La cobertura d'aquests és molt extensa, amb disponibilitat en més de 3 000 emplaçaments repartits principalment entre els Estats Units (EEUU) i Europa²³.

²³ Més informació a <https://energyplus.net/weather>

2.1.2 Geometria dels edificis i l'entorn

Els UBEM requereixen d'una representació 3D dels elements que componen una ciutat, en especial dels edificis però també del seu entorn, és el que es coneix com els aspectes geomètrics del parc edificat (Johari et al., 2020).

Les propietats geomètriques inclouen les formes i superfícies de l'embolcall dels edificis (façanes, coberta, etc.), les obertures de façana, així com el propi terreny (Reinhart & Cerezo Davila, 2016). Val a dir que, en funció de si la zona que es vol simular existeix o és de nova construcció, aquesta informació pot ser extreta de bases de dades ja existents o ha de ser creada des de zero. De la mateixa manera que la informació climàtica, el tipus i qualitat de les dades geomètriques tenen un efecte directe sobre la precisió dels resultats del model. Alguns dels paràmetres fonamentals per a la simulació energètica (p. ex. les superfícies exteriors exposades, l'espai climatitzat, la relació entre els edificis, l'exposició a la radiació i al context urbà, entre altres) es calculen a partir de la geometria (Johari et al., 2020). A continuació es detallen els tres aspectes principals de la geometria dels edificis i l'entorn necessaris per la implementació d'un UBEM: (1) volumetria del parc edificat, (2) finestres, i (3) representació del terreny.

2.1.2.1 Volumetria del parc edificat

La representació de la volumetria dels edificis pot realitzar-se en diferents nivells de detall. El concepte nivell de detall, conegut sota les sigles LoD, de l'anglès *Level of Detail*, és un concepte que defineix el grau d'abstracció dels objectes del món real en un model digital tenint en compte certs aspectes com ara les necessitats de l'usuari o els recursos computacionals i econòmics (Biljecki, 2013). En l'àrea del modelat de ciutats, l'estàndard CityGML de l'*Open Geospatial Consortium*²⁴ defineix cinc nivells de detall per a la representació del parc edificat que difereixen entre ells per la seva riquesa geomètrica. La Figura 2.3 presenta els cinc nivells de detall definits per l'estàndard CityGML. Tot i que en aquesta s'aprecia una clara progressió del LoD0 al LoD4, convé notar que no tots els elements representats progressen al mateix ritme, i que fins i tot no tots els elements estan presents en tots els nivells.

²⁴ <https://www.ogc.org/>



Figura 2.3. Nivells de detall definits per l'estàndard CityGML

Font. Biljecki, Ledoux, & Stoter (2016)

El nivell LoD0 és la representació geomètrica més bàsica d'un edifici que consisteix en un model digital del terreny en 2.5D. Bàsicament aquest nivell representa la petjada de l'edifici, i es sol utilitzar principalment per aplicacions regionals i paisatgístiques. El següent nivell, el LoD1, és el primer nivell en el qual els edificis són representats mitjançant una volumetria. Aquests, anomenats caixes de sabates o *shoebox* en anglès, estan representats per elements prismàtics de sostre pla realitzats mitjançant una extrusió simple de la petjada de l'edifici. El LoD2, tot i seguir representant els edificis mitjançant una geometria simplificada, presenta una important millora pel que fa a la representació de la coberta. En efecte, en aquest nivell es poden diferenciar tres tipus de coberta: coberta plana, a dos aigües, o a quatre aigües. Val a dir que els LoD2 estan considerats com els més adequats per a projectes a escala urbana. En el cas del LoD3, la representació exterior dels edificis és molt més detallada, tant pel que fa als sostres com a les façanes. A més, sol incloure la representació d'altres elements exteriors com finestres i portes. Finalment, el nivell LoD4, és una extensió del LoD3 al qual se li han afegit elements de l'interior dels edificis com divisions interiors, escales, portes interiors, i fins i tot mobiliari (Biljecki et al., 2016).

La volumetria dels edificis necessària per la implementació dels UBEM es pot obtenir mitjançant diversos mètodes d'obtenció (Biljecki et al., 2015), tot i que la majoria dels realitzats a dia d'avui es basen en la informació cadastral estàndard, és a dir, en la informació vectorial representant la petjada dels edificis a partir de la qual es realitza una extrusió del tipus caixa de sabates, o *shoebox*, corresponent a un LoD1 (veure Figura 2.3). Val a dir que, tot i l'existència d'UBEM implementats mitjançant volumetries LoD2 (Peronato, 2019; Weiler et al., 2019), Nouvel et al. (2017) remarca que l'impacte d'utilitzar una volumetria superior al LoD1 per a representar els edificis és poc significatiu, afirmant que els errors produïts per la manca de detall de la volumetria poden ser compensats mitjançant la incorporació de propietats no-geomètriques.

Per generar l'extrusió, a més de la informació vectorial, és imprescindible disposar de l'altura dels edificis. Tot i que hi ha casos en els quals aquesta dada s'inclou en el cadastre o

altres registres relacionats amb els edificis (Caputo et al., 2013; Österbring et al., 2016) aquest fet és poc probable, i generalment s'han de buscar alternatives per tal d'obtenir aquesta informació. Existeixen diferents maneres d'obtenir les altures dels edificis (C. Wang et al., 2022), no obstant, la més freqüent és estimar una distància mitjana entre plantes d'acord amb la normativa d'habitabilitat, així com les particularitats constructives de cada cas d'estudi, i calcular l'altura en funció del nombre de plantes de cada edifici (Cerezo Davila et al., 2016; Perez, 2014).

Una possibilitat per obtenir l'altura dels edificis cada vegada més habitual és l'ús de dades LiDAR. De l'anglès *Light Detection And Ranging*, el sistema LiDAR és una tecnologia que permet determinar la distància des d'un emissor làser embarcat en un vehicle de recol·lecció ja sigui aeri (p. ex. avió, helicòpter, etc.) o terrestre (p. ex. cotxe, quad, etc.), a un objecte o superfície. Aquesta tècnica de teledetecció òptica utilitza la llum làser per obtenir una mostra densa de la superfície de la terra produint mesuraments exactes de les coordenades x , y i z (veure Figura 2.4), generant un *dataset* de núvol de punts en format LAS.

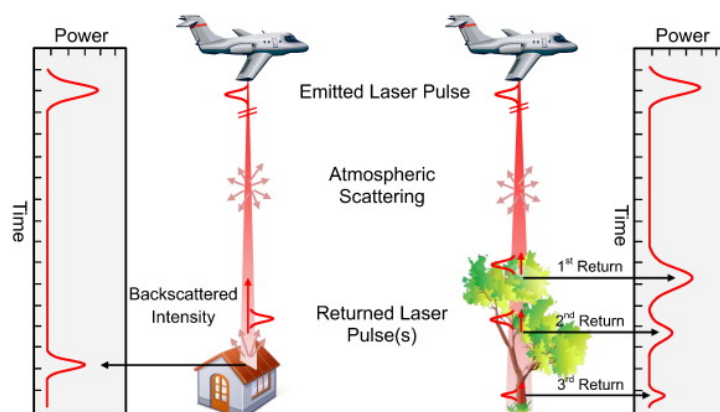


Figura 2.4. Il·lustració de l'obtenció de dades LiDAR d'un edifici (esquerra) i d'un arbre (dreta) a través d'un mitjà de recol·lecció aeri

Font. Yan, Shaker, & El-Ashmawy (2015)

2.1.2.2 Finestres

La representació de les finestres en la volumetria dels edificis tant sols està inclosa en volumetries LoD3 o superiors (veure Figura 2.3), per tant, en els casos dels UBEM en els quals la volumetria sol ser com a màxim un LoD2, aquestes s'han de definir independentment de la geometria dels edificis. Les finestres normalment es defineixen mitjançant un rati d'obertura de finestres, més conegut per l'acrònim WWR de l'anglès *window-to-wall ratio*, i a diferència d'altres dades relacionades amb els edificis com el nombre

de plantes, els cadastres rara vegada contenen aquesta informació. Tot i l'existència de mètodes considerablement precisos per obtenir els WWR, com ara la utilització d'imatges aèries (Yang et al., 2015) o mitjançant LiDAR (R. Wang et al., 2011), les pràctiques més habituals solen recórrer a les normatives i els codis de la construcció pertinents (Sokol et al., 2017) o inclús a la consulta d'experts com en el cas de l'UBEM de Boston en el qual es va establir un rati entre 0 i 1 on 0 significa que la façana en qüestió no disposa d'obertura, i 1 que la totalitat de la façana és una finestra (Cerezo Davila et al., 2016).

2.1.2.3 Representació del terreny

De manera general, el terreny sol ser representat mitjançant un Model Digital d'Elevacions (MDE), àmpliament disponibles en molts països. Els MDE són una representació digital dels valors d'altitud del terreny que permeten representar el relleu (Nunes, 2013). El terme MDE és una denominació genèrica que pot fer referència tant a Models Digitals de Superfície (MDS) com a Models Digital del Terreny (MDT) (veure Figura 2.5). Els MDS representen la superfície de la Terra inclosos els objectes que hi ha al damunt (p. ex. arbres o edificis), mentre que els MDT representen la superfície del sòl, sense objectes a sobre. Tanmateix, tot i que el terme MDE engloba els dos conceptes, és la denominació més emprada per a referir-se als MDT.

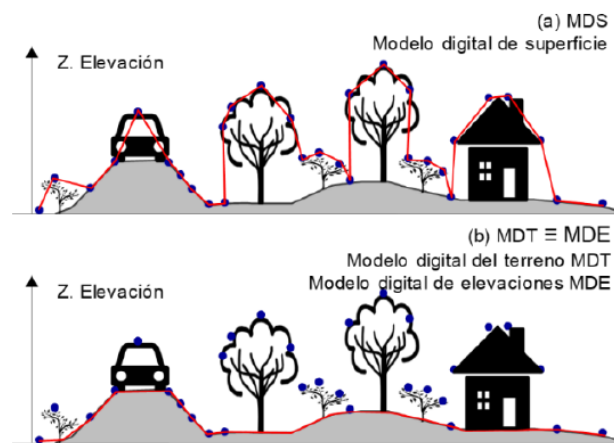


Figura 2.5. Diferència entre un MDS (a) i un MDE (b)

Font. Escobar Villanueva (2020)

Val a dir que malgrat l'efecte del terreny en el consum energètic dels edificis estigui reconegut principalment vinculat a la generació d'ombres, rara vegada es té en compte en els UBEM (Österbring et al., 2016; Reinhart & Cerezo Davila, 2016).

2.1.3 Propietats no-geomètriques

Les propietats no-geomètriques dels edificis consisteixen, entre d'altres, en les propietats tèrmiques de l'embolcall exterior, els sistemes de calefacció i refrigeració, la il·luminació, els aparells elèctrics, així com l'ús que en fan els seus usuaris. Aquestes són molt diverses i poden variar considerablement segons l'activitat desenvolupada en l'edifici. Sent les dades més complicades de recopilar de tota la fase de caracterització dels UBEM, les propietats no-geomètriques estan considerades com la major font de discrepàncies entre els resultats dels models i la realitat energètica del parc edificat (Cerezo Davila et al., 2016; Reinhart & Cerezo Davila, 2016).

Mentre que en el procés de recopilació de les dades no-geomètriques per un BEM, la informació detallada dels edificis es pot obtenir a partir del projecte constructiu o d'una auditoria, aquesta tasca esdevé tot un repte quan es tracta de models a escala urbana (Sokol et al., 2017). Per aquest motiu, quan s'estudien centenars, milers o inclús desenes de milers d'edificis, com és el cas dels UBEM, és habitual recórrer a la metodologia arquetip.

Aquesta tècnica de modelització de tipus *bottom-up* consisteix en segmentar el parc edificat en subconjunts el més homogenis possible formats per edificis similars, en base a determinades característiques amb influència sobre la demanda energètica (Reinhart & Cerezo Davila, 2016; Swan & Ugursal, 2009). Una vegada establerts aquests subconjunts, la informació detallada d'un o varis edificis dins d'un mateix grup, anomenats arquetips, s'extrapola a la resta d'edificis pertanyents a un mateix grup. Val a dir que encara que el terme arquetip és el més habitual, aquesta tècnica també es coneguda sota el nom d'edificis de referència (Ballarini et al., 2014; Corgnati et al., 2013; Schaefer & Ghisi, 2016), edificis representatius (Arambula Lara et al., 2014), o tipologies d'edificis (Dascalaki et al., 2011).

Àmpliament utilitzada en el context de les modelitzacions energètiques a escala urbana de diferents extensions (p. ex. parc d'edificis nacionals, regionals, barris, etc.), la metodologia arquetip es realitza en dues etapes, (1) la fragmentació i (2) la definició. A continuació s'exposa en que consisteix cadascuna d'aquestes, i els diferents mètodes i tècniques utilitzats fins a dia d'avui.

2.1.3.1 Fragmentació del parc edificat

La primera etapa és la fragmentació del parc edificat que consisteix en la divisió de l'estoc d'edificis objecte en subgrups composts per edificis tipològicament similars. Com s'ha mencionat anteriorment, no existeix una metodologia estàndard i el debat es centra principalment en la manera com es fragmenta el parc edificat, així com en les variables utilitzades per a fer-ho. Les metodologies emprades fins a dia d'avui per a la realització de

la fragmentació es divideixen en tres grups: (1) la fragmentació determinista, (2) la fragmentació probabilista i (3) l'anàlisi de clúster.

- **Fragmentació determinista**

És l'enfocament més utilitzat per dividir el parc edificat i consisteix en una classificació de l'estoc d'edificis basada en variables categòriques. Generalment, les dues variables més utilitzades per aquest tipus de fragmentació són l'any de construcció, emprat per determinar materials de construcció i sistemes constructius, i l'ús dels edificis, utilitzat per definir els sistemes energètics i equipaments presents en els edificis, així com els diferents patrons d'utilització d'aquests. Cal destacar que un gran nombre de treballs de recerca s'han centrat en una sola tipologia d'ús de l'edifici (Firth & Lomas, 2009; Fracastoro & Serraino, 2011; Mastrucci et al., 2014), evitant la necessitat de tenir en compte aquesta darrera variable. Hi ha casos en que també s'han utilitzat altres variables com les zones climàtiques (Ballarini et al., 2014; Dascalaki et al., 2011; Filogamo et al., 2014; Fracastoro & Serraino, 2011; Mata et al., 2014) quan el parc edificat té extensions molt àmplies com és el cas dels UBEM a escala de país, així com el tipus de sistemes de calefacció i refrigeració (Theodoridou et al., 2011), la forma de l'edifici (Caputo et al., 2013; Mavrogianni et al., 2009) i inclús l'àrea d'aquests (Shimoda et al., 2004).

Tot i que l'enfocament determinista és un dels més utilitzats, aquesta classificació simplificada pot tergiversar l'àmplia varietat de sistemes i especialment el comportament dels ocupants. En aquest sentit, Reinhart & Cerezo Davila (2016) assenyalen que els errors en els resultats de simulació obtinguts a partir d'una fragmentació determinista es compensen quan s'analitzen de manera agregada i a resolucions anuals reportant errors molt baixos, però aquests poden arribar fins al 1000% quan s'analitzen a escales desagregades i a resolucions temporals horàries (Oraiopoulos & Howard, 2022).

- **Fragmentació probabilista**

L'enfocament probabilista, contràriament al determinista en el qual les variables utilitzades per a la fragmentació són escollides en base al criteri d'expert, consisteix en la identificació estadística de les variables més adequades per a realitzar la fragmentació utilitzant dades històriques de consum energètic com a indicador auxiliar (Cerezo et al., 2017; Dall'ó et al., 2012; Famuyibo et al., 2012). Tot i que els subgrups obtinguts a partir d'aquesta fragmentació són significativament més representatius de la diversitat energètica del parc edificat en comparació amb l'enfocament determinista degut a que aquest últim pot introduir un grau de subjectivitat en el procés, aquest enfocament ha estat rarament utilitzat.

Els motius d'aquest fet podrien ser, d'una banda, la inaccessibilitat a les dades mesurades de consum energètic a causa de les polítiques de confidencialitat de les empreses subministradores d'energia. D'altra banda, el tipus i la gran quantitat de dades relacionades amb el parc edificat requerides per poder aplicar aquest enfocament és també un limitant. Un exemple de fragmentació probabilista és el treball de Famuyibo et al. (2012), en el qual es realitza una anàlisi de regressió lineal de 23 variables amb el consum energètic per identificar quines variables eren més adequades per a fragmentar el parc edificat. Algunes d'aquestes variables són aspectes com la transmitància dels diferents elements de l'embolcall dels edificis (parets, teulada, finestres, etc.), el gruix de l'aïllament o el percentatge d'humitat, totes elles sent paràmetres molt tècnics que rara vegada es disposen, i menys per a la totalitat del parc edificat. Val la pena destacar que, d'acord amb els resultats de l'anàlisi de regressió lineal, de les 23 variables tant sols una es podia utilitzar per a la fragmentació.

- **Anàlisi de clúster**

Recentment, el desenvolupament de tècniques de *machine learning* i *data mining*, com l'anàlisi de clúster, han obert nous horitzons en la fase de fragmentació. L'anàlisi de clúster és una tècnica de classificació de dades no supervisada que s'utilitza per descobrir grups i identificar distribucions interessants en les dades subjacents (Guha et al., 1998). Realitzat en quatre etapes, selecció de variables, selecció de l'algoritme de clúster, validació i interpretació de resultats (Gianniou et al., 2018), l'anàlisi de clúster té com a objectiu agrupar objectes en grups o classes de manera que els objectes dins del mateix clúster tinguin característiques similars (alta homogeneïtat interna), mentre que els objectes en diferents clústers tinguin poca similitud (alta heterogeneïtat externa) (Schaefer & Ghisi, 2016).

Un dels punts forts de l'enfocament de clúster en comparació amb els exposats anteriorment és que aquest permet descobrir agrupacions d'edificis resultants d'estructures ocultes (Ben-Dor et al., 1999), ja que la informació de pertinença és totalment desconeguda. Tot i que les tècniques de clusterització s'han aplicat en molts contextos i disciplines, és un concepte força recent en el camp d'estudi dels UBEM i en el desenvolupament d'arquetips d'edificis. En aquest sentit, alguns treballs de recerca s'han centrat principalment en identificar l'algoritme per l'anàlisi de clúster més adequat per a variables relacionades amb els edificis, així com en determinar les variables més apropiades per dur a terme l'anàlisi de clúster (Ali et al., 2018; Tardioli et al., 2018).

2.1.3.2 Definició dels paràmetres no-geomètrics

Un cop es disposa del parc edificat fragmentat, s'han de definir els paràmetres no-geomètrics que afecten al comportament energètic dels edificis per cadascun dels subconjunts obtinguts. La quantitat, el tipus, així com el detall de les dades necessàries per fer-ho dependrà, d'una banda, de la informació disponible, i d'una altra de les dades requerides per l'eina escollida en les fases posteriors de generació i simulació de l'UBEM.

L'adquisició de les dades no-geomètriques dels edificis és sovint una tasca difícil. Normalment aquestes són molt escasses i de mala qualitat, estan incompletes, i en alguns casos són inaccessibles per diverses raons com per exemple polítiques de confidencialitat, interessos econòmics o barreres tecnològiques. A més, inclús quan estan disponibles, les dades poden trobar-se a diferents escales temporals i/o nivells d'agregació. Aquestes es poden recollir de la literatura existent, de valors nacionals o normatius, consultant experts del sector de la construcció i edificació, a través d'enquestes energètiques o inclús, de vegades, es pot accedir a informació més granular provinent d'auditories energètiques o de sensors (Tardioli et al., 2018).

Pel que fa a la definició, tradicionalment les dades no-geomètrics es defineixen de manera determinista, però en un intent d'aconseguir representar l'ampli ventall de sistemes i equipaments existents en un mateix arquetip, recentment s'han proposat alternatives probabilistes (Johari et al., 2020).

- **Definició determinista**

La definició determinista és el mètode més utilitzat per definir els paràmetres no-geomètrics d'un UBEM. Aquesta consisteix en determinar un únic valor a assignar a cada propietat no-geomètrica i que s'utilitza per la totalitat dels edificis que componen l'arquetip. Un exemple dels valors que es solen utilitzar són valors mitjos de transmitàncies tèrmiques per definir els aspectes arquitectònics (p. ex. en façanes, cobertes, etc.), coeficients de rendiment (COP, de l'anglès *Coefficient of Performance*) per definir els sistemes de climatització, així com horaris d'ocupació i ús tipus, per definir els patrons de comportament dels usuaris.

Malgrat la seva funcionalitat, per poder fer front a la incertesa intrínseca de les dades utilitzades per la definició, així com a la poca o inexistent informació sobre alguns paràmetres com el comportament dels ocupants, en el seu lloc s'han començat a proposar enfocaments probabilístics.

- **Definició probabilista**

Inclús fent una caracterització molt detallada mitjançant dades extreptes dels edificis, els arquetips definits en base a una definició determinista no tenen la capacitat de representar l'ampli ventall d'intensitats d'ús d'energia de tots els edificis continguts dins d'un mateix arquetip. A més, a aquest fet s'ha d'afegir la incertesa associada a algunes propietats com per exemple la transmitància dels materials que componen l'embolcall exterior o la utilització que els ocupants fan dels equipaments i sistemes, que pot variar segons la font d'informació utilitzada (Sokol et al., 2017). Bàsicament, la diferència amb la definició determinista és que les propietats no-geomètriques es defineixen per paràmetres probabilístics amb valors mínims i màxims acceptables com per exemple distribucions uniformes (Cerezo et al., 2017; Sokol et al., 2017), o distribucions normals (Buffat et al., 2017).

Els paràmetres d'alta incertesa per excel·lència en l'àmbit de la modelització energètica són els relacionats amb el comportament dels usuaris i l'ús que fan dels sistemes i equipaments, sobretot en el sector residencial (Branco et al., 2004; Majcen et al., 2013). Segons una enquesta realitzada al Regne Unit, el consumidor domèstic amb un ús d'energia més alt pot consumir fins a deu vegades més que el més baix (Godoy-Shimizu et al., 2014).

Tot i poder millorar la precisió dels resultats de les simulacions energètiques dels UBEM, Johari et al. (2020) remarquen que la definició probabilista encara no ha estat introduïda completament en els UBEM degut a la complexitat suplementària que aporta augmentant el temps d'operació ja que cada edifici ha de ser simulat múltiples vegades.

2.2 Caracterització del parc edificat d'Escaldes-Engordany

Tal com s'ha presentat en la secció anterior, l'abstracció del parc edificat en arquetips representatius, malgrat ser un imperatiu dels UBEM, comporta un risc de sobre-simplificació del parc edificat que es tradueix en resultats del model imprecisos. En aquesta secció, a través del cas d'estudi a Escaldes-Engordany, es proposa una nova metodologia de fragmentació basada en dades d'ús d'energia mesurades amb l'objectiu d'identificar agrupacions d'edificis més representatives de la realitat energètica del parc edificat.

2.2.1 Dades disponibles

La disponibilitat de dades al Principat d'Andorra és encara a dia d'avui força escassa i les relacionades amb el parc edificat no en són una excepció. Un clar exemple d'això és el cadastre que malgrat l'existència de la Llei del cadastre (BOPA 29/2008), encara hi ha parròquies que no el tenen completat a dia d'avui. Sortosament no és el cas d'Escaldes-Engordany que disposa d'un cadastre actualitzat i força detallat, un dels motius principals pels quals s'ha escollit com a cas d'estudi. Tot i aquesta escassetat s'han aconseguit recopilar les següents dades útils per la implementació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany:

- **Dades climàtiques**

Les dades climàtiques característiques de la parròquia d'Escaldes-Engordany s'han obtingut a partir de dues fonts d'informació diferents.

D'una banda, del Servei Meteorològic Nacional del Govern d'Andorra que s'encarrega de gestionar les dades que recullen les diferents estacions meteorològiques repartides al llarg del país. Aquestes dades són públiques i estan disponibles per descàrrega via web^{2.5}.

L'altra font d'informació utilitzada per a les dades climàtiques ha estat l'Atles Climàtic d'Andorra^{2.6} (ACDA). L'ACDA consta d'un conjunt de mapes climàtics amb una resolució espacial de 90 metres que descriuen el clima d'Andorra durant el trentenni climàtic de referència 1981-2010 (Batalla et al., 2016).

- **Cadastre**

Proporcionat pel Departament d'Urbanisme del Comú d'Escaldes-Engordany^{2.7}, la informació continguda en el cadastre de la parròquia es divideix en dos tipus. D'una banda, la informació vectorial representant tots els edificis del parc edificat mitjançant polígons, tots ells associats a un identificador anomenat codi de l'edifici, i d'altra banda, un fitxer amb les dades cadastrals habituals associades a cadascun dels edificis.

Una de les particularitats de la informació continguda en el cadastre és que algunes dades són a escala d'edifici i, per tant, només hi ha una única entrada per edifici. D'altres són a escala de recinte o unitat cadastral, que són unitats més reduïdes de l'edifici i, per tant, disposen de múltiples registres per edifici. La Figura 2.6 presenta les principals dades del cadastre així com la seva escala. Val a dir que algunes de les dades són exactament iguals

^{2.5} <http://meteo.ad/climatologia>

^{2.6} <http://www.acda.ad/>

^{2.7} Comunicació personal del Comú d'Escaldes-Engordany

tot i estar a diferents escales com és el cas de l'adreça. En total, el cadastre d'Escaldes-Engordany conté 40 030 entrades per un total de 1 298 edificis.

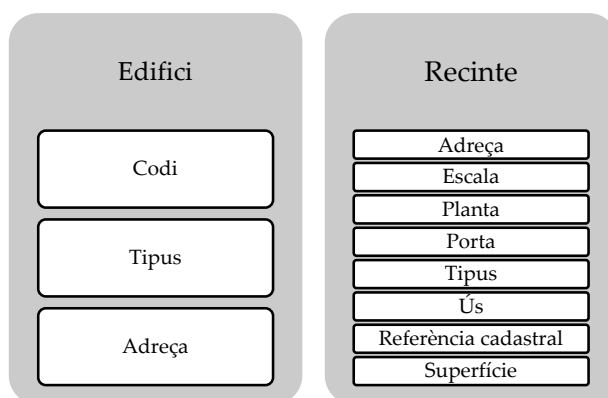


Figura 2.6. Principals dades contingudes en el cadastre d'Escaldes-Engordany segons l'escala
Font. Elaboració pròpia

- **Ús d'energia elèctrica**

FEDA, principal entitat del país importadora, generadora, distribuïdora i comercialitzadora d'energia elèctrica a Andorra ha proporcionat les dades d'ús d'energia elèctriques utilitzades en la present tesi²⁸. Cal assenyalar que, en el cas concret d'Escaldes-Engordany, FEDA és la distribuïdora i comercialitzadora única de la parròquia.

Les dades obtingudes corresponen als consums elèctrics mensuals entre els anys 2014-2017 de tots els comptadors instal·lats per FEDA dins del territori andorrà. A banda de les dades de consum, FEDA també ha proporcionat una sèrie d'arxius amb informació addicional com les coordenades amb la ubicació dels comptadors, l'escomesa, l'edifici, així com informació relacionada amb la planta i la porta a la qual han estat assignats els comptadors. En total, les dades referents al consum elèctric mensual contenen 41 140 comptadors dels quals 9 580 pertanyen a edificis situats a Escaldes-Engordany.

- **Font energètica dels equips de producció de calefacció**

La informació sobre els tipus d'instal·lacions existents de calefacció ha estat proporcionada pel Departament de Medi Ambient i Sostenibilitat del Govern d'Andorra²⁹. Aquesta informació es recopila per finalitats de seguretat de les instal·lacions i inclou principalment el tipus de combustible utilitzat (fuel domèstic, electricitat o gas) i en alguns

²⁸ Comunicació personal de FEDA

²⁹ Comunicació personal del Departament de Medi Ambient i Sostenibilitat

casos el tipus de sistema (p. ex. aerotèrnia). En el moment de la recopilació de la informació (22/02/2019), es disposava de dades de gairebé el 40% dels edificis de la parròquia d'Escaldes-Engordany.

- **Dades LiDAR**

Obtingudes del Departament de Cartografia del Govern d'Andorra, les dades LiDAR en format LAS del Principat d'Andorra són públiques^{2.10}. L'última versió disponible correspon al vol realitzat l'any 2018 amb una resolució espacial d'1 punt/m².

La immensa majoria d'aquestes dades recopilades no es poden utilitzar directament en la implementació de l'UBEM, sinó que s'han d'adaptar i completar amb altres dades addicionals. Existeix una àmplia varietat de dades i informació que poden ser utilitzades en un UBEM que poden ser més o menys precises, així com estar més o menys agregades, i fins i tot tenir diferent format en funció dels requisits de l'eina utilitzada en la fase de generació. Aquesta determinarà les dades a integrar en el model, per aquest motiu és avantatjós conèixer per endavant l'eina de generació, i sobretot els paràmetres d'entrada que aquesta necessita.

En el cas de l'UBEM d'Escaldes-Engordany l'eina de generació utilitzada és el *plugin* ArchSim Energy Modelling (Dogan, 2013) que es detallarà més endavant en el Capítol 3, centrat en la fase de generació de l'UBEM. La Figura 2.7 mostra les dades necessàries per implementar un UBEM en ArchSim classificades en base al tipus de dada al que pertanyen: informació climàtica, geometria dels edificis i entorn, i propietats no-geomètriques. Pel que fa a les propietats no-geomètriques, ArchSim les divideixen en cinc grans grups: càrregues internes que correspon a la il·luminació i els aparells elèctrics, els sistemes de climatització, la ventilació, l'aigua calenta sanitària (ACS), i els materials de construcció.

^{2.10} <https://www.cartografia.ad/dades-lidar>

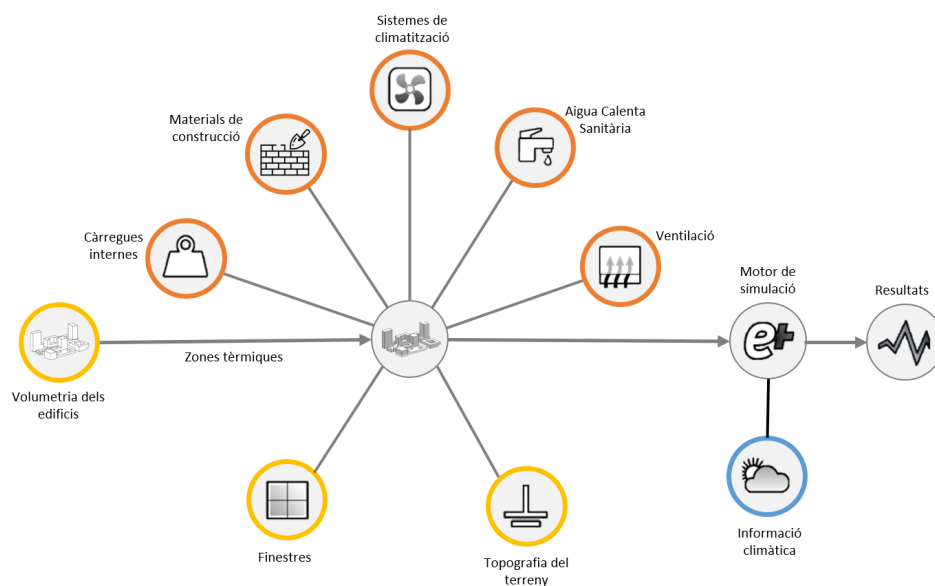


Figura 2.7. Dades utilitzades per l'eina ArchSim diferenciant els tres tipus de dades d'entrada: informació climàtica (en blau), geometria dels edificis i entorn (en groc) i propietats no-geomètriques (en taronja)

Font. Elaboració pròpia

A continuació es detalla l'obtenció de les dades de l'UBEM d'Escaldes-Engordany.

2.2.2 Informació climàtica

A diferència de la majoria de països, Andorra no disposa de cap arxiu climàtic oficial. Per aquest motiu, ha estat necessari construir l'arxiu climàtic d'Escaldes-Engordany a utilitzar en la posterior simulació. Degut a la inexistència de dades mesurades suficients per construir un arxiu climàtic utilitzable en l'UBEM, s'ha optat per construir-lo partint de dades de models meteorològics.

S'ha generat un fitxer TMY mitjançant l'eina *TMY generator*^{2.11} de PVGIS 5 amb dades del període 2006-2015. Aquest representa, per a les 8 760 hores de l'any, els valors de temperatura seca, temperatura del punt de rosada, humitat relativa, pressió atmosfèrica, radiació horitzontal global, radiació normal directa, radiació horitzontal difusa, radiació infraroja, direcció del vent i velocitat del vent. Pel que fa a l'obtenció de les dades, el projecte PVGIS 5 obté la radiació solar de les bases de dades SARAH o NSRDB en funció de la localització, mentre que la resta de variables provenen del producte de reanàlisis *ECMWF*

^{2.11} Més informació a https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#TMY

ERA-Interim^{2.12} en el qual s'hi apliquen mètodes de *downscaling* (Huld et al., 2017). Una de les particularitats de l'arxiu TMY generat amb PVGIS 5 és que la temperatura seca ha estat corregida mitjançant les dades de l'ACDA. Per a cada mes s'ha aplicat una constant de correcció calculada a través de les temperatures mitjanes mensuals provinents del fitxer de PVGIS 5 i de l'ACDA. El procés de correcció del fitxer TMY amb dades locals d'Andorra s'ha publicat al GitHub d'ARI^{2.13} permetent d'aquesta manera la construcció ràpida i senzilla de fitxers climàtics en format *.epw* (*EnergyPlus weather format*) en qualsevol punt del territori andorrà.

2.2.3 Geometria dels edificis i l'entorn

2.2.3.1 Volumetria del parc edificat

La volumetria dels edificis de la zona d'estudi s'ha realitzat extrudint els polígons continguts en l'arxiu vectorial inclòs en el cadastre obtenint d'aquesta manera una volumetria del tipus LoD1. Pel que fa a l'alçada, s'ha utilitzat el número de plantes contingut en el cadastre i s'ha estimat una alçada lliure de les plantes de 2,5 m al no disposar d'informació més detallada.

Prèviament a l'extrusió s'ha realitzat una simplificació de les dades vectorials per reduir la gran quantitat de punts i segments dels polígons originals del cadastre. Generalment, els polígons 2D dels cadastres es solen extreure automàticament d'imatges satèl·lit o vols fotogramètrics pel que inclouen una gran varietat de plecs, corbes i detalls. L'extrusió d'aquestes formes complexes dona lloc a volumetries innecessàriament detallades compostes per una gran quantitat de superfícies que els programes de simulació no tenen la capacitat de resoldre i que, a més, prologuen considerablement el temps de simulació (Cerezo Davila et al., 2016).

Dels diferents mètodes de simplificació existents, en l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ha utilitzat l'algoritme Douglas-Peucker desenvolupat per Douglas & Peucker (1973). També conegut com a *Ramer-Douglas-Peucker algorithm*, *iterative end-point fit algorithm* o *Split-and-merge algorithm*, aquest algoritme consisteix en seleccionar de la línia o polígon a simplificar certs punts, anomenats punts crítics o d'ancoratge, que conformaran la línia o polígon simplificat establint prèviament un factor de tolerància (T) expressat en unitats de longitud (veure Figura 2.8).

^{2.12} Més informació a <https://www.ecmwf.int/>

^{2.13} <https://github.com/andorra-ri/energiand>

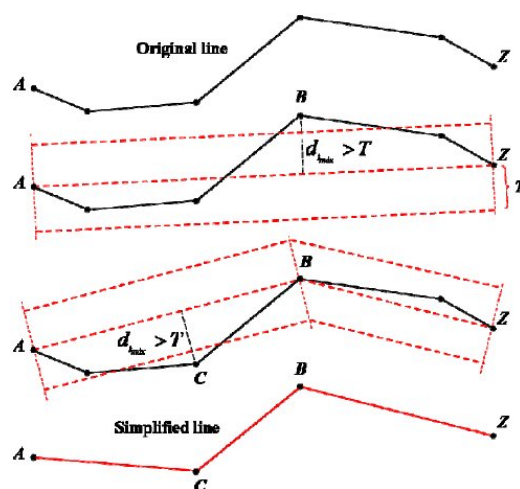


Figura 2.8. Aplicació de l'algoritme Douglas-Peucker en una línia

Font. González Crespo, Lorenzo Romero, Sanjuan Martínez, & Montenegro-Marín (2014)

Amb l'objectiu de preservar el màxim possible la forma original de les dades vectorials, s'ha establert la tolerància mínima permesa d'1m. Tot i ser la mínima, la Figura 2.9 mostra la important reducció de vèrtex en un dels edificis d'Escaldes-Engordany passant de 43 a 8, simplificant sobretot les cantonades dels edificis amb formes arrodonides.

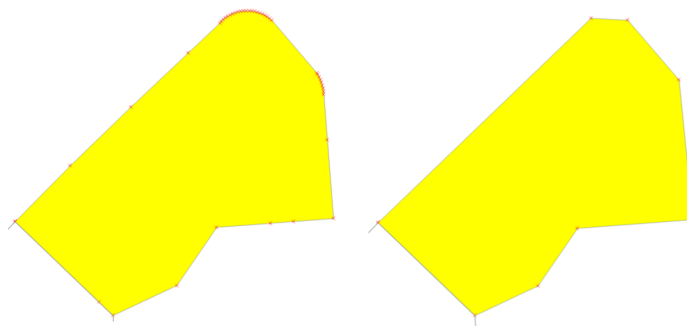


Figura 2.9. Simplificació de les dades vectorials contingudes en el cadastre mitjançant l'aplicació de l'algoritme Douglas-Peucker

Font. Elaboració pròpia

Posteriorment a la simplificació s'han revisat els polígons un a un superposant els polígons simplificats i els originals per preservar les adjacències originals, corresponents a les parets mitgeres, entre els edificis. La Figura 2.10 mostra els principals problemes d'adjacències que poden sorgir de la simplificació de geometries.

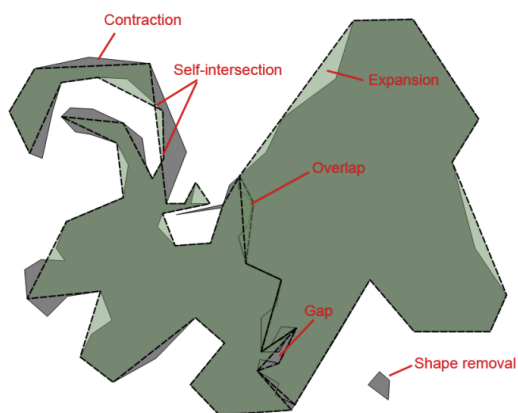


Figura 2.10. Problemàtiques derivades de la simplificació de geometries

Font. Ferràs Calvo (2014)

D'altra banda, tal com mostra la Figura 2.11, Escaldes-Engordany està situat en una zona muntanyosa amb un relleu molt irregular. Per situar els edificis en la seva cota d'altitud, s'ha determinat el punt més alt per cadascun dels edificis a partir de les dades LiDAR disponibles (Capítol 2 secció 2.2.1).



Figura 2.11. Fotografia de la parròquia d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

Val a dir que, tot i que inicialment s'havia previst establir l'alçada dels edificis mitjançant les dades LiDAR, el fet de disposar d'un important nombre d'edificis amb plantes semisoterrades, així com les irregularitats del terreny, no han permès fer ús d'aquestes dades més enllà de la definició de la cota més elevada de cadascun dels edificis.

2.2.3.2 Finestres

Degut a l'absència d'informació en el cadastre o altres bases de dades pel que fa a les finestres dels edificis, en l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ha optat per estudiar una mostra dels edificis i extrapolar els resultats a la resta del parc edificat.

En total, s'han analitzat les façanes de prop de 100 edificis residencials d'Escaldes-Engordany seleccionats de manera aleatòria. Per a cada edifici s'han extret les dimensions tant de la façana com de totes les finestres a partir d'imatges com la mostrada en la Figura 2.12, i s'ha establert un WWR (veure Annex B).



Figura 2.12. Definició dels WWR per l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia amb imatges de Google Street View

2.2.3.3 Topografia del terreny

Per representar el terreny de l'UBEM s'han utilitzat les dades LiDAR públiques del Principat d'Andorra (Capítol 2 secció 2.2.1). A partir d'aquestes, i filtrant els punts categoritzats com a terra, s'ha construït un MDT amb una mida de cel·la de 5 m. Com que l'UBEM es centra exclusivament a la zona d'Escaldes-Engordany, s'ha generat el MDT únicament de la superfície que té un impacte directe en la zona d'estudi amb l'objectiu

d'alleugerir al màxim els elements que componen el model. Tot i la importància d'acotar la zona d'estudi, cal remarcar que el terreny ha d'incloure l'àrea suficient que permeti tenir en compte les ombres provocades per l'orografia.

L'àrea d'interès a considerar en el MDT s'ha determinat mitjançant el mètode *viewshed*^{2.14} inclòs a ArcGIS Pro, el qual permet identificar les zones d'un ràster amb visió directa respecte un o varis punts (Travesset-Baro et al., 2021). D'aquesta manera, i tenint en consideració la trajectòria solar, s'obté la zona a incloure en el MDT tenint en compte el terreny i els edificis inclosos en el model. La Figura 2.13 mostra el *viewshed* de la Vall Central (Andorra la Vella més Escaldes-Engordany) amb el qual s'ha delimitat la zona d'estudi que inclou tant les edificacions de la zona urbana com les muntanyes que hi provoquen ombres. El color blau representa la zona visible des dels observadors (punts vermells) ubicats en edificis.



Figura 2.13. *Viewshed* de la Vall Central

Font. Travesset-Baro et al. (2021)

^{2.14} <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/viewshed-2.htm>

2.2.4 Propietats no-geomètriques

Per definir les propietats no-geomètriques de l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ha recorregut a la metodologia arquetip com és habitual en la implementació d'UBEM (Capítol 2 secció 2.1.3).

2.2.4.1 Fragmentació

Tal com s'ha avançat anteriorment, la fragmentació del parc edificat s'ha realitzat a partir d'una nova metodologia híbrida que combina la clàssica aproximació determinista i l'anàlisi de clúster (Capítol 2 secció 2.1.3.1). Borges et al. (2022) presenten una descripció detallada d'aquest nou enfocament que consisteix en una classificació dels edificis en tres etapes (veure Figura 2.14), utilitzant diferents mètodes (determinista i anàlisi de clúster) i dades.

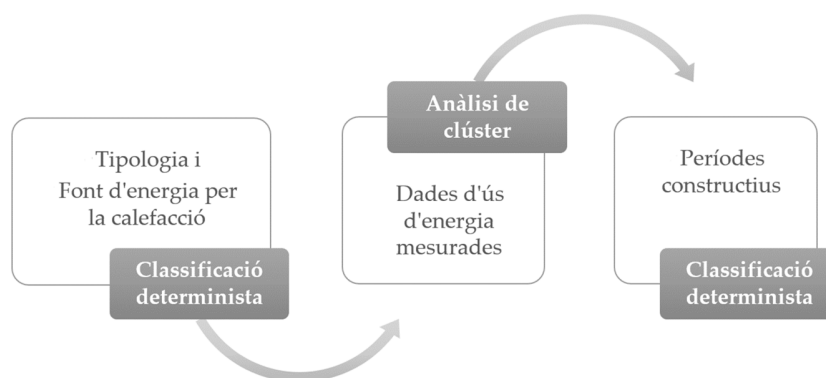


Figura 2.14. Mètodes de classificació i dades de la metodologia híbrida aplicada a l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

En la metodologia proposada, primerament es classifiquen els edificis en base a la seva tipologia (unifamiliar o plurifamiliar), així com la font d'energia utilitzada per al sistema de calefacció (fuel domèstic o electricitat). Una de les particularitats energètiques d'Escaldes-Engordany, i del Principat d'Andorra en general, és que els edificis utilitzen principalment dues fonts d'energia, l'electricitat i el fuel domèstic, o en menor mesura, únicament electricitat. Val a dir que també hi ha edificis en els que s'utilitza gas butà o propà, però són casos molt aïllats i, per tant, poc significatius (Travesset-Baro, 2017a). En aquesta primera classificació, per diferenciar les tipologies dels edificis s'ha utilitzat la informació continguda en el cadastre, i per distingir el tipus de sistema de calefacció s'ha utilitzat la informació proporcionada pel Departament de Medi Ambient i Sostenibilitat del Govern

d'Andorra (Capítol 2 Secció 2.2.1). Com s'ha comentat, a l'hora de la seva adquisició aquesta dada no existia per la totalitat del parc edificat pel que s'ha realitzat un anàlisi lineal de discriminants (LDA de l'anglès *Linear Discriminant Analysis*) per poder extrapolar les dades a la totalitat dels edificis d'Escaldes-Engordany (Borges et al., 2022). A partir de les correlacions entre els graus dia calorífics determinats en base a les dades de temperatura de l'estació meteorològica del Prat Gran del Servei Meteorològic Nacional (Capítol 2 secció 2.2.1) i els consums elèctrics normalitzats per les seves corresponents superfícies extretes del cadastre, l'anàlisi LDA ha permès determinar el tipus d'energia principal de la resta d'edificis amb un error del 6%. La Figura 2.15 presenta els edificis dels quals es coneixia la font energètica per al sistema de calefacció així com els edificis pels quals aquesta s'ha determinat mitjançant l'anàlisi LDA. En aquesta s'aprecia que la font d'energia per al sistema de calefacció predominant és el fuel domèstic utilitzada en el 89% dels edificis residencials.

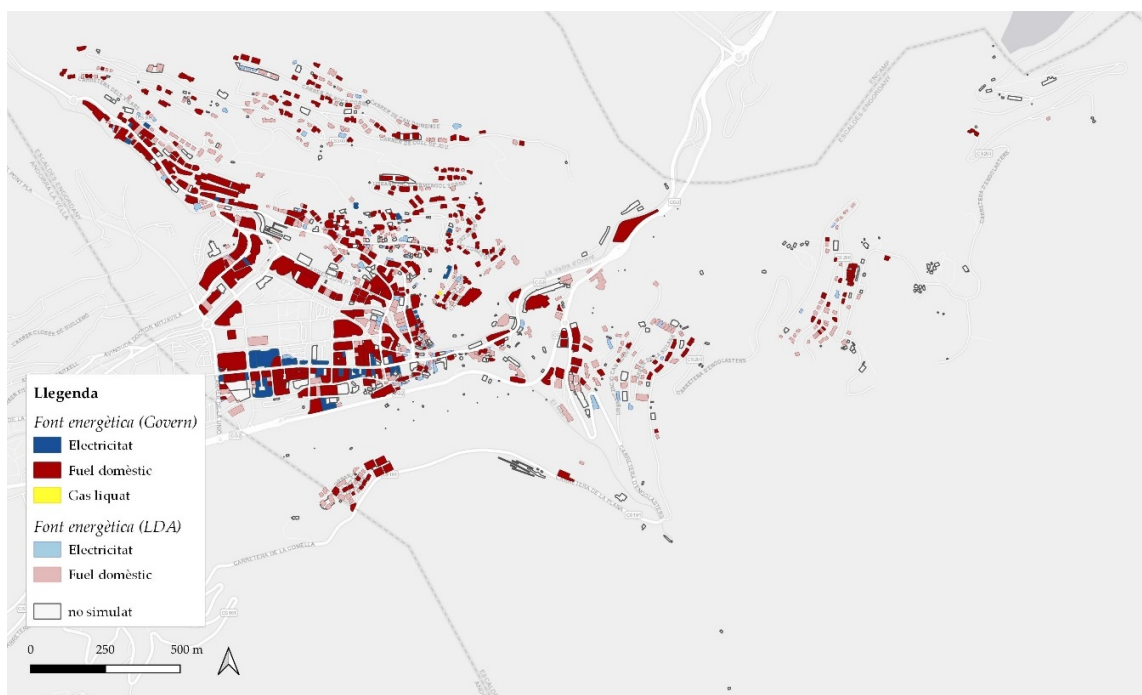


Figura 2.15. Font energètica del sistema de calefacció dels edificis real inspeccionats pel Ministeri de Medi Ambient, i estimada en base al LDA

Font. Elaboració pròpia

Una vegada obtinguts els grups de la primera classificació, aquests s'han tornat a classificar amb una anàlisi de clúster utilitzant l'algoritme *K-means*, àmpliament utilitzat per

les comercialitzadores d'energia per agrupar clients (Gianniou et al., 2018). Utilitzant els consums elèctrics mensuals per superfície com a variables, aquesta segona classificació ha permès posar de manifest una agrupació de les unitats cadastrals no identificable mitjançant una fragmentació determinista. Per aquesta divisió la classificació realitzada prèviament segons la font d'energia per la calefacció és de gran rellevància atès que les variables utilitzades per aquesta classificació són dades mesurades de consum elèctric les quals representen la totalitat del consum d'energia per alguns edificis i per d'altres tant sols una part.

Finalment, els subgrups obtinguts de l'aplicació del clúster s'han classificat una darrera vegada en base als períodes constructius dels edificis. Aquests s'han basat en l'estudi de COAA i SaAs (2012) encomanat per FEDA. Aquest informe inclou una caracterització exhaustiva del parc edificat on es defineixen quatre períodes constructius fins l'any 2010 segons les característiques arquitectòniques del edificis. A banda d'aquests quatre períodes constructius, s'ha considerat un cinquè període que correspon als edificis construïts a partir del 2011 i que han de seguir les directrius del Reglament energètic en l'edificació (Govern d'Andorra, 2010). La Figura 2.16 presenta els diferents períodes constructius tinguts en compte en l'UBEM d'Escaldes-Engordany.

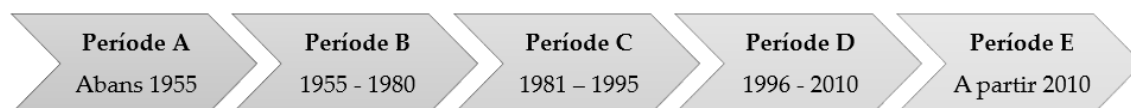


Figura 2.16. Períodes constructius de l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

Les tres fragmentacions presentades, així com l'ordre en el qual s'han realitzat, tenen una important rellevància. D'una banda, l'objectiu de les dues primeres fragmentacions, tipologia d'edificis i anàlisi de clúster, és diferenciar característiques comunes pel que fa als sistemes i equipaments presents, així com a l'ús que en fan els ocupants. Tot i tenir consums i superfícies similars, dues unitats cadastrals de diferent tipologia no es poden caracteritzar de la mateixa manera. D'igual manera, si el sistema de calefacció és elèctric o mitjançant fuel domèstic, tot i presentar consums similars, cal tractar-los de forma diferenciada ja que cada sistema té característiques i rendiments propis. D'altra banda, la fragmentació per períodes constructius té la finalitat de diferenciar les propietats relacionades amb els paràmetres arquitectònics i que corresponen als materials i sistemes constructius dels diferents elements de l'embolcall dels edificis. Generalment, aquests paràmetres estan directament vinculats a aspectes com l'any de construcció dels edificis, les normatives vigents, les tecnologies

existents en el mercat i els models constructius imperants. Aquests fets fan que les edificacions construïdes en un mateix període constructiu presentin moltes característiques comunes.

Una de les novetats d'aquest enfocament híbrid és l'escala de les dades utilitzades. Fixar els arquetips a escala d'edificis, com és el cas més habitual, pot portar a errors addicionals en els model degut a que un mateix edifici, i inclús una planta d'un edifici, pot estar format per unitats cadastrals de diferents usos coneguts com edificis d'ús mixt. En el cas d'Escaldes-Engordany els edificis d'ús mixt representen el 33% del parc edificat. A més, la realització de la fragmentació mitjançant dades a escala d'unitat cadastral en l'anàlisi de clúster també ha permès desvelar l'existència d'una gran heterogeneïtat no només entre edificis, sinó dins d'un mateix edifici i per una mateixa tipologia. La fragmentació dels edificis residencials d'Escaldes-Engordany revela que el 83% dels edificis plurifamiliars es componen de més d'un arquetip, no només en un mateix edifici sinó inclús en una mateixa planta (Borges et al., 2022). Aquesta heterogeneïtat s'explica principalment per la influència dels usuaris en el comportament energètic dels edificis, així com per la gran varietat d'electrodomèstics, aparells elèctrics i sistemes de climatització presents en els habitatges. De fet, un dels aspectes més difícils de replicar en l'àmbit de la modelització d'edificis és el comportament dels usuaris, que ha estat objecte de nombrosos treballs de recerca (C. Wang et al., 2022).

Tal com es reclamava per diversos autors (Cerezo Davila et al., 2016; Tardioli et al., 2018), en aquest nova metodologia s'utilitzen dades de consum energètic en la fase de fragmentació. Tanmateix, les dades de consum per si soles no tenen la capacitat de diferenciar entre tipologies d'edificis, així com l'aplicació de l'anàlisi de clúster per si sol tampoc té la capacitat de determinar les tipologies o períodes constructius, d'aquí el plantejament d'un enfocament híbrid per compensar aquestes carències.

2.2.4.2 Definició dels paràmetres no-geomètrics

Per la definició de les propietats no-geomètriques del parc edificat d'Escaldes-Engordany, aquestes s'han dividit en dos grups. D'una banda, les propietats relacionades amb els aspectes arquitectònics dels edificis, és a dir, propietats dels materials de construcció així com els sistemes constructius que componen l'embolcall dels edificis i les finestres. D'altra banda, les propietats corresponents als aparells elèctrics i sistemes presents en els habitatges, així com la utilització que els usuaris fan d'aquests. El motiu d'aquesta divisió es deu principalment al procediment realitzat per l'obtenció de la informació, així com també als subgrups d'edificis als quals s'ha assignat cada tipus de propietats.

2.2.4.2.1 Propietats dels paràmetres arquitectònics

Una important característica a destacar pel que fa als paràmetres arquitectònics, i raó per la qual s'han separat de la resta de propietats no-geomètriques és que aquests s'han definit a escala d'edifici. Tot i que es pot donar el cas que aquestes propietats siguin diferents en un mateix edifici (p. ex. un propietari que ha substituït les finestres del seu habitatge o que ha millorat l'aïllament d'aquest per la part interior, etc.), els paràmetres arquitectònics generalment tenen les mateixes característiques per la totalitat d'un edifici.

Com s'ha mencionat anteriorment, les edificacions construïdes en un mateix període constructiu presenten moltes característiques comunes, per aquest motiu les propietats dels elements arquitectònics dels edificis s'han definit per cadascun dels períodes constructius prèviament utilitzats en la fragmentació (Capítol 2 secció 2.2.4.1). A banda d'establir els períodes constructius característics del Principat d'Andorra fins l'any 2010, l'estudi de COAA & SaAs (2012) descriu amb alt nivell de detall els diferents materials així com les transmitàncies d'alguns dels elements que componen l'embolcall dels edificis construïts fins l'any 2010, més concretament de les façanes i les cobertes. Per establir les propietats de la resta d'elements de l'embolcall dels edificis (forjats, soleres i mitgeres) s'ha utilitzat l'Annex 2 de l'estudi sobre la rendibilitat econòmica i la idoneïtat tecnològica de l'aplicació de diferents mesures energèticament eficients a diferents tipologies d'edificis residencials (ICAEN, 2013). Val a dir que les tipologies edificatòries i sistemes constructius establerts en aquest informe estan dividits en períodes constructius molt similars als establerts per COAA & SaAS (2012) al Principat d'Andorra. Per definir les propietats del període constructiu posterior a l'any 2010 s'ha utilitzat el Reglament energètic en l'edificació (Govern d'Andorra, 2010) en el qual es defineixen els valors límit i valors objectiu per a diferents aspectes que han de complir tots els edificis construïts a partir del 2011, entre els quals s'hi troben els elements arquitectònics.

2.2.4.2.2 Aparells elèctrics, sistemes de climatització i ús

Contràriament a les propietats dels paràmetres arquitectònics, els aparells i sistemes presents en els habitatges poden ser molt diversos, no només entre els edificis, sinó inclús en un mateix edifici. A més, el consum energètic d'aquests depèn, en gran part, de l'ús que en fan els usuaris. Tot i que l'eficiència dels aparells elèctrics i sistemes de climatització probablement hagi millorat des de l'any de construcció de l'edifici, a diferència dels aspectes arquitectònics, els edificis construïts en un mateix període no tenen per què disposar de sistemes i equips elèctrics amb característiques similars, i encara menys ser utilitzats de la mateixa manera pels usuaris. Un habitatge nou pot disposar d'equipaments antics i a la inversa. Per aquest motiu, les propietats relacionades amb els aparells elèctrics, els sistemes

de climatització i l'ús s'han definit per cadascun dels subgrups identificats a través de l'anàlisi de clúster (Capítol 2 secció 2.2.4.1).

La configuració de l'ArchSim per assignar les propietats dels equipaments, sistemes de climatització, així com l'ús que en fan els usuaris consisteix en quatre grans grups: (1) càrregues elèctriques que inclou la il·luminació i els aparells elèctrics, (2) els sistemes de climatització i ventilació mecànica, (3) la ventilació i les infiltracions, i (4) l'ACS.

Contràriament als aspectes arquitectònics, existeix molt poca informació disponible per caracteritzar els equipaments, els sistemes i el seu ús a la parròquia d'Escaldes-Engordany. Per aquest motiu s'ha realitzat una enquesta, l'Enquesta del Consum Energètic dels Edificis Residencials (ECEER), per recopilar la informació mancanta. Borges, Pages-Ramon, & Travesset-Baro (2021) descriuen l'enquesta realitzada enfocada a recopilar informació per implementar els UBEM, i en detallen el cas d'Escaldes-Engordany. Els processos relacionats amb l'enquesta des de la fase inicial de disseny fins a la definició de les propietats no-geomètriques es divideixen en cinc etapes: (1) identificació de les dades no disponibles, (2) concepció de l'enquesta i definició de les variables de resposta, (3) definició de la mostra i recollida de dades, (4) anàlisi dels resultats i (5) transformació dels resultats de l'enquesta en informació útil per al model.

Centrada específicament en la tipologia d'edificis d'ús residencial, el disseny i l'estructura de l'ECEER s'ha inspirat en l'enquesta *Residential Energy Consumption Survey*^{2.15} (RECS) realitzada per la *U.S. Energy Information Agency*^{2.16} (EIA) i s'ha adaptat a la realitat energètica d'Escaldes-Engordany, així com a les dades d'entrada requerides per ArchSim, l'eina de generació.

L'enquesta es va realitzar de manera personal per enquestadors de l'eix Societat d'ARI^{2.17} a una mostra representativa del parc edificat d'Escaldes-Engordany entre novembre de 2019 i juliol de 2020. Tot i que les enquestes personals requereixen de més recursos i temps que les telefòniques, es va escollir aquest mètode perquè l'índex de resposta sol ser més elevat, per evitar errors deguts a la manca de comprensió de les preguntes per part de l'enquestat i per poder dirigir l'enquesta a edificis específics i així assegurar la representativitat de la mostra.

Segons el cadastre, la parròquia d'Escaldes-Engordany disposa de 1 271 edificis dels quals 794 disposen almenys d'una referència cadastral amb ús residencial. Per tal de disposar de representativitat dels dos grans grups d'edificis que formen el sector residencial,

^{2.15} Més informació a <https://www.eia.gov/consumption/residential/about.php>

^{2.16} <https://www.eia.gov/>

^{2.17} <https://www.ari.ad/societat>

aquests s'han dividit en dos grups abans de calcular la mostra, els totalment elèctrics i els que a banda de l'electricitat utilitzen fuel domèstic, prèviament identificats (Capítol 2 secció 2.2.4.1). L'enquesta s'ha realitzat en 294 habitatges dels quals 44 són totalment elèctrics i 250 utilitzen fuel domèstic per a la calefacció. La mostra s'ha calculat per un nivell de confiança del 95% i un marge d'error del $\pm 3\%$.

L'ECEER^{2.18} (veure Annex C) es va realitzar amb l'eina Survey123^{2.19} i, a banda d'haver-la creat amb l'objectiu d'obtenir informació dels edificis d'Escaldes-Engordany, està preparada per ser utilitzada en altres parròquies del país si es considera oportú. El visor interactiu^{2.20} implementat (veure Figura 2.17) permet consultar espacialment les enquestes realitzades i accedir a bona part de les dades recopilades. Val a dir que, per motius de protecció de dades, en aquest visor públic s'han ocultat algunes de les respostes recollides (p. ex. nom de l'enquestador/a, horaris d'ús d'equipaments, etc.).

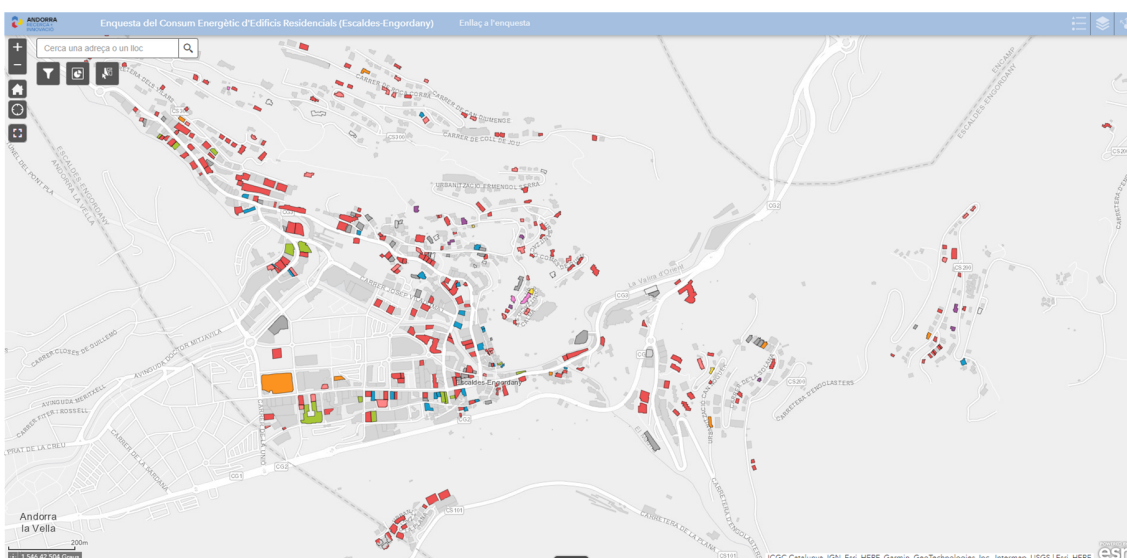


Figura 2.17. Visor interactiu de consulta del parc edificat i les respostes dels edificis enquestats

Font. Elaboració pròpia

^{2.18} Accés a l'enquesta completa: <https://arcg.is/0Xamru>

^{2.19} <https://survey123.arcgis.com/>

^{2.20} Accés al visor: <https://arcg.is/1zrz1T>

2.3 Paràmetres d'entrada de l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Aquesta segona secció destinada a caracteritzar el parc edificat residencial d'Escaldes-Engordany es centra en presentar els valors dels paràmetres utilitzats per generar l'UBEM, fruit de la caracterització detallada en la secció anterior.

2.3.1 Fitxer climàtic d'Escaldes-Engordany

L'arxiu final amb les dades climàtiques d'Escaldes-Engordany és un fitxer amb extensió *.epw* amb valors horaris anuals de les següents 10 variables: temperatura seca, punt de rosada, humitat relativa, pressió atmosfèrica, radiació horitzontal global, radiació directa normal, radiació horitzontal difusa, radiació infraroja, direcció i velocitat del vent. El fitxer generat segons descrit en la secció 2.2.2, s'utilitza directament com a input de l'eina de simulació. La Figura 2.18 mostra els valors anuals d'aquestes variables incloses en el fitxer climàtic generat per l'UBEM d'Escaldes-Engordany.

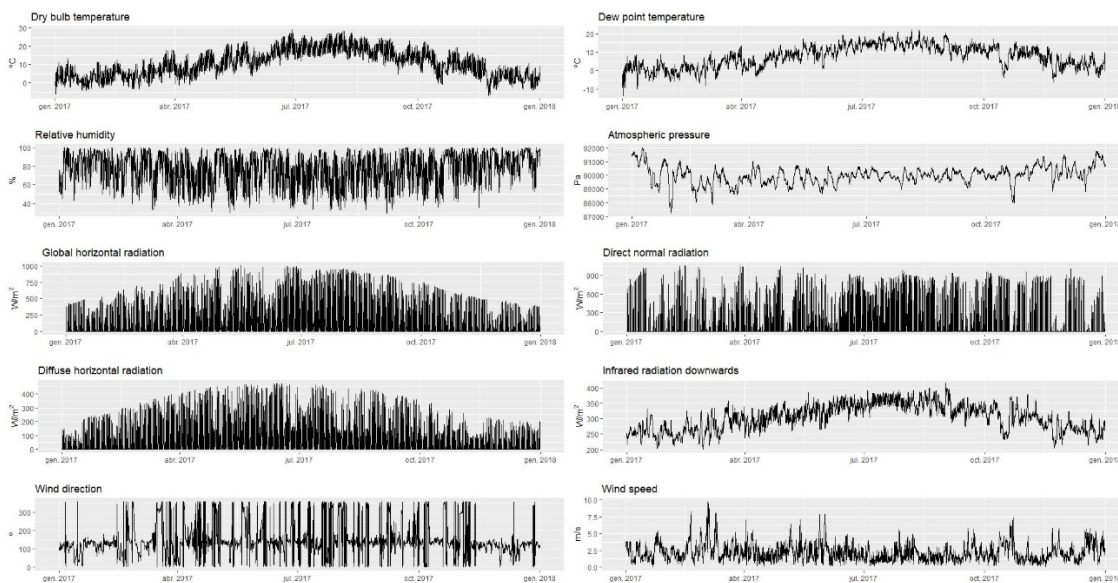


Figura 2.18. Variables i valors horaris continguts en el fitxer climàtic d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia amb dades de PVGIS 5 i l'ACDA

2.3.2 Geometria dels edificis i l'entorn d'Escaldes-Engordany

2.3.2.1 Dades vectorials 2D dels edificis

L'arxiu vectorial amb els polígons simplificats dels edificis del parc edificat d'Escaldes-Engordany (Capítol 2 secció 2.2.3.1) és un fitxer en format SIG (Sistema d'Informació Geogràfica). Tal com mostra la Figura 2.19, el parc edificat d'Escaldes-Engordany es compon de 1 271 edificis dels quals 794 tenen ús residencial. Val a dir que dels edificis residencials, 35 han quedat exclosos de l'UBEM per manca de dades de consum energètic.

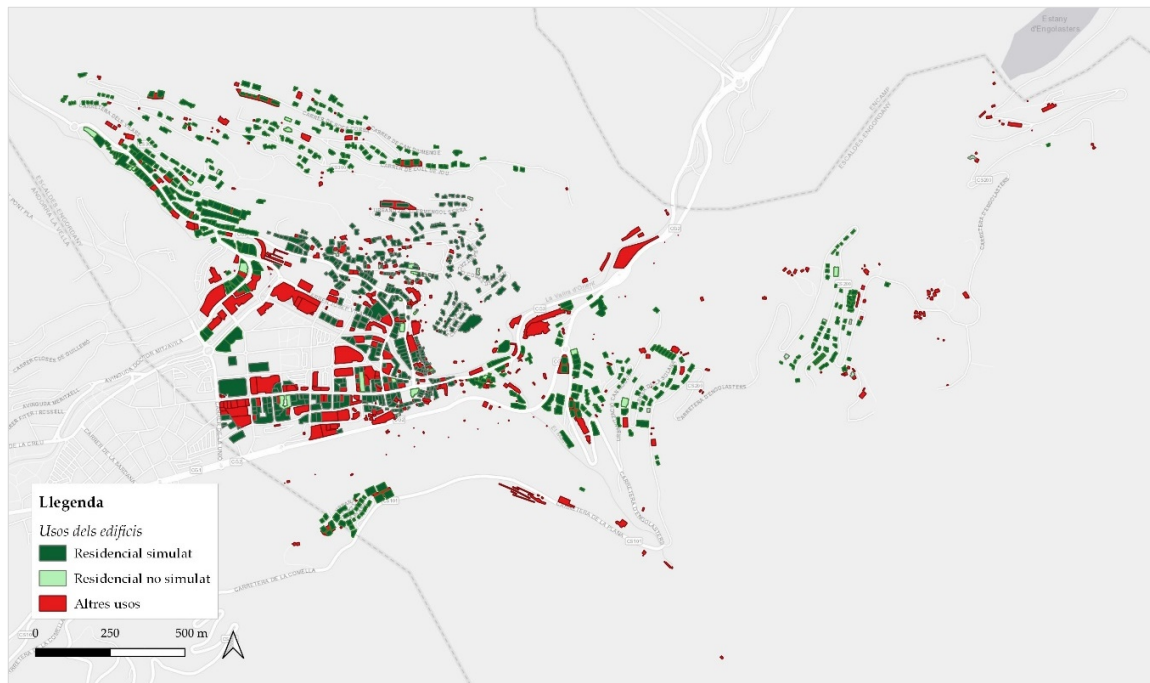


Figura 2.19. Dades vectorials del cadastre després de la simplificació diferenciant els edificis amb ús residencial (en verd), i els edificis amb usos no-residencials (en vermell)

Font. Elaboració pròpia a partir de dades del cadastre

2.3.2.2 WWR dels edificis

Els valors de WWR obtinguts de les façanes analitzades (Capítol 2 secció 2.2.3.2) es mostren en la Figura 2.20. En aquesta s'aprecia que el rang és molt ampli, sent 6% el percentatge d'obertura més petit, i 47% el més gran. Tot i això, destaca que el 50% dels valors es concentren entre el 18% i el 29%, amb una mitjana de 24%.

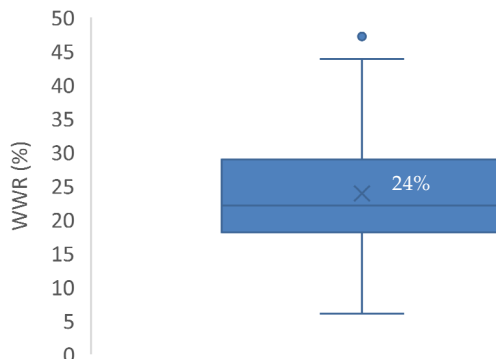


Figura 2.20. Valors de WWR de les façanes analitzades a Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

Al no haver pogut determinar un valor de WWR per subgrups d'edificis, com per exemple segons períodes constructius, s'ha escollit la mitjana com el valor a utilitzar en la totalitat dels edificis. En l'Annex B es detallen els valors obtinguts per cadascuna de les façanes analitzades.

2.3.2.3 Model digital del terreny

El MDT generat (Capítol 2 secció 2.2.3.3) s'ha exportat en un fitxer .tif, format adequat per l'eina de generació escollida.

2.3.3 Propietats no-geomètriques

2.3.3.1 Arquetips representatius

Tot i no ser una dada directa a incloure en el model, els arquetips resultants de la fase de fragmentació són un dels resultats més rellevants de la caracterització de l'UBEM no només degut a la novetat aportada per la metodologia, sinó que pel seu impacte directe sobre les propietats no-geomètriques a determinar per definir cadascun d'aquests. La Taula 2.1 presenta els subgrups obtinguts en cadascuna de les tres fragmentacions (Capítol 2 secció 2.2.4.1), així com els arquetips resultants d'aquestes. A més, també es concreta la quantitat d'unitats cadastrals que contenen els diferents subgrups. En total s'han obtingut 37 arquetips aplicant la metodologia híbrida en els edificis residencials del parc edificat d'Escaldes-Engordany constituïts per 8 clústers i 5 períodes constructius. En aquesta s'aprecia que la categoria predominant és la plurifamiliar (RM) amb el 93% de les unitats cadastrals, així com el tipus de calefacció mitjançant fuel domèstic amb un 92% de les unitats

cadastrals. Pel que fa a l'anàlisi de clúster, el número òptim de clústers determinat és 2 per tots els subgrups obtinguts de la primera fragmentació, i exceptuant les unitats cadastrals del tipus RME, el clúster 1 sempre es compon per més unitats cadastrals que el clúster 2. També s'observa que la quantitat d'unitats cadastrals que componen els arquetips obtinguts és molt irregular amb arquetips formats per tant sols una unitat cadastral, i d'altres superant el miler.

Classificació per tipologies		Classificació per clúster		Classificació per períodes constructius				
Categoria	Font energètica calefacció	Nº òptim de clústers	Clúster	Període A Pre-1955	Període B 1955-1980	Període C 1981-1995	Període D 1996-2010	Període E Post-2010
Plurifamiliar 5833 uc	Fuel domèstic 5349 uc	2	RMF 1 4634 uc	404 uc	1988 uc	669 uc	1529 uc	44 uc
			RMF 2 715 uc	105 uc	312 uc	57 uc	237 uc	4 uc
	Electricitat 484 uc	2	RME 1 276 uc	124 uc	69 uc	12 uc	71 uc	-
			RME 2 208 uc	84 uc	65 uc	5 uc	54 uc	-
Unifamiliar 447 uc	Fuel domèstic 409 uc	2	RSF 1 333 uc	18 uc	76 uc	149 uc	89 uc	1 uc
			RSF 2 76 uc	7 uc	23 uc	27 uc	17 uc	2 uc
	Electricitat 38 uc	2	RSE 1 34 uc	4 uc	7 uc	9 uc	10 uc	4 uc
			RSE 2 4 uc	1 uc	1 uc	1 uc	1 uc	-

uc: unitat cadastral

Taula 2.1. Arquetips obtinguts per al parc edificat residencial d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

La Figura 2.21 mostra l'arquetip majoritari per cadascun dels edificis de la parròquia d'Escaldes-Engordany. En aquesta també s'aprecien els edificis contenint més d'un arquetip que correspon al 16% dels edificis que componen l'UBEM d'Escaldes-Engordany. Pel que fa a la distribució dels arquetips, els pertanyents a la categoria residencial plurifamiliar (RM) es situen en la seva gran majoria en el fons de vall, en el nucli urbà de la parròquia, mentre que els edificis pertanyents a la categoria residencial unifamiliars (RS) es situen principalment en urbanitzacions allunyades. Referent a la distribució dels arquetips segons la font d'energia per la calefacció, electricitat o fuel domèstic, no es detecta cap zonificació, sinó que estan repartits en tot el territori aleatòriament. Amb l'objectiu de facilitar-ne la seva

consulta, tant els resultats obtinguts en la determinació dels arquetips com de la font d'energia utilitzada en calefacció s'han publicat de forma oberta en un mapa interactiu^{2.21}.

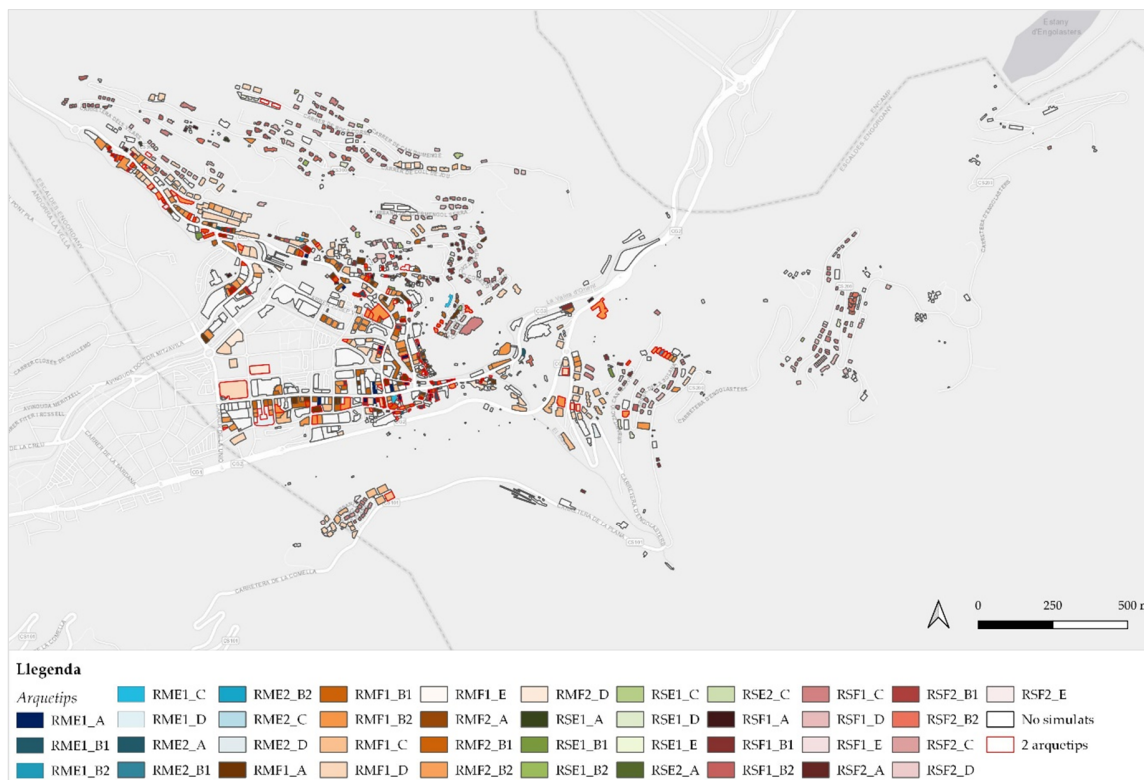


Figura 2.21. Distribució dels arquetips obtinguts de la parròquia d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

Al llarg de la tesi, per referir-se als diferents arquetips definits es farà referència als seus corresponents acrònims. Aquests corresponen a un codi de sis xifres format per quatre lletres, un número i una altra lletra precedida d'un guió baix. La primera lletra, que correspon a la R de residencial, fa referència a l'ús de la unitat cadastral que en aquest cas és sempre residencial. La següent lletra indica la tipologia de la unitat cadastral definida com M de *multifamily* per a les unitats cadastrals plurifamiliars, o S de *single-family* per a les unitats cadastrals unifamiliars. Seguidament s'indica el tipus de font d'energia per la calefacció, indicant E per l'electricitat, i F per al fuel domèstic, seguit d'un número que indica el clúster (1 o 2). Finalment, s'indica el període constructiu en base a la definició presentada en la secció 2.2.4.1.

^{2.21} Accés al visor: <https://arcg.is/0yWvn0>

2.3.3.2 Paràmetres arquitectònics dels edificis

Com exposat en la secció 2.2.4.2.1, les propietats no-geomètriques relacionades amb els aspectes paramètrics es defineixen a escala d'edifici, i per cadascun dels cinc períodes constructius establerts en la fragmentació. Aquestes s'han extret principalment d'informes i estudis previs com es detalla a continuació.

- **Elements de l'embolcall**

Les propietats dels diferents elements de l'embolcall dels edificis així com de les finestres, extrets de COAA & SaAs (2012), ICAEN (2013) i Govern d'Andorra (2010) es detallen en la Taula 2.2. Val a dir que en el cas de les façanes, a més de definir les propietats per als períodes A, B, C i D, per al període constructiu B, en línia amb el proposat per COAA & SaAs (2012), es distingeixen dos subperíodes B1 i B2.

Cobertes	A	Estructura de coberta amb bigues de fusta, tesella i coberta de pissarra clavada. ($U = 2,49 \text{ W/m}^2\text{-K}$)	
	B	Estructura de coberta amb biga o tauló de fusta, encadellat interior de pi, tesella, làmina impermeable (cartró embreat anomenat tartalina o làmina asfàltica) i coberta de pissarra clavada. ($U = 1,40 \text{ W/m}^2\text{-K}$)	
	C	Estructura de coberta amb biga o tauló de fusta, encadellat interior de pi, aïllament interior (3 a 5 cm disposat dins del cel ras), tarima de tesella, làmina impermeable (asfàltica o PVC) i coberta de pissarra clavada. ($U = 0,60 \text{ W/m}^2\text{-K}$)	
	D	Estructura de coberta de fusta, amb bigues de tauló de secció rectangular de tesella, o llosa de formigó armat aïllament (llana mineral de 5-8 cm), cambra d'aire, tarima de tesella, lamina impermeable (PVC) i coberta de pissarra clavada. ($U = 0,41 \text{ W/m}^2\text{-K}$)	
	E	Valor límit: $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{-K}$	
Façanes	A	Parets de pedra de 40-50 cm de gruix, granítiques a la part alta de la vall i calcàries a la sud, acabats arrebossats. ($U = 2,97 \text{ W/m}^2\text{-K}$)	
	B	Subperíode B1. Abans dels 70'	Subperíode B2. Després dels 70'
		Façanes amb acabat arrebossat, formades per una fulla exterior ceràmica (14 cm), cambra d'aire i envà interior enguixat (sense aïllament). ($U = 1,55 \text{ W/m}^2\text{-K}$)	Façanes amb acabat de pedra, fulla ceràmica (14 cm) doblada exteriorment per una paret (18-20 cm) de pedra granítica, calcària o de pissarra (llicorella), acabat interior de la fulla portant amb enguixat. ($U = 2,30 \text{ W/m}^2\text{-K}$)
	C	Façanes amb acabat de pedra, fulla ceràmica (14 cm) doblada exteriorment per una paret (18-20 cm) de pedra granítica, calcària o de pissarra (llicorella) amb aïllament de 3 a 5 cm de poliestirè (llana mineral cap al final de període) situat entre la fulla portant i la de pedra acabat interior de la fulla portant i la de pedra, acabat interior de la fulla portant amb enguixat. ($U = 0,58 \text{ W/m}^2\text{-K}$)	
	D	Façanes amb acabat de pedra, formades per una fulla ceràmica (14 cm) doblada exteriorment per una paret (18-20 cm) de pedra granítica, calcària o de pissarra (llicorella), aïllament de 5-8 cm de poliestirè o llana mineral (o per un gruix indeterminat de poliuretà projectat), de vegades amb un envà interior ceràmic enguixat o cartró-guix. ($U = 0,41 \text{ W/m}^2\text{-K}$)	
E	Valor límit: $U = 0,20 \text{ W.m}^2\text{-K}$		
Mitgera	A	Paret de 14 cm de fàbrica de maó massís (14x29 cm) amb revestiment a dues cares. <ul style="list-style-type: none"> • Revestiment exterior arrebossat (Densitat: 1525; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,8; Gruix: 0,02) • Paret de fàbrica de maó massís (Densitat: 2170; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,99; Gruix: 0,14) • Revestiment interior enguixat (Densitat: 750; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,3; Gruix: 0,02) 	

Mitgera	B	Paret de 14 cm de maó calat amb revestiment dues cares. <ul style="list-style-type: none"> • <i>Revestiment exterior arrebossat</i> (Densitat: 1600; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,87; Gruix: 0,02) • <i>Paret de fàbrica de maó calat</i> (Densitat: 1600; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,76; Gruix: 0,14) • <i>Revestiment interior enguixat</i> (Densitat: 800; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,3; Gruix: 0,02)
	C	Paret de 14 cm de maó calat amb revestiment dues cares. <ul style="list-style-type: none"> • <i>Revestiment exterior arrebossat</i> (Densitat: 1525; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,8; Gruix: 0,02) • <i>Paret d'obra de maó calat</i> (Densitat: 1020; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,567; Gruix: 0,14) • <i>Revestiment interior enguixat</i> (Densitat: 1525; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,8; Gruix: 0,02)
	D	
	E	Valor límit: U = 0,20 W.m².K
	<hr/>	
Soleres	A	Solera sobre terreny de paviment ceràmic, morter d'aferrament i replè compactat. (U = 0,56 W/m².K)
	B	Solera sobre terreny de paviment ceràmic, morter d'aferrament, formigó i replè compactat. (U = 0,72 W/m².K)
	C	Solera de paviment de terratzo, morter d'aferrament, forjat sanitari de semibiguetes i revoltó de formigó. (U = 1,08 W/m².K)
	D	Solera de paviment de terratzo, morter d'aferrament, forjat sanitari de semibiguetes i revoltó de formigó. (U = 1,07 W/m².K)
	E	Valor límit: U = 0,20 W/m².K
<hr/>		
Forjats	A	Forjat unidireccional de bigues de fusta i revoltons ceràmics: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Paviment de rajola ceràmica</i> (Densitat: 2000; Capacitat tèrmica: 0,8; Conductivitat tèrmica: 1,0; Gruix: 0,03) • <i>Morter de ciment</i> (Densitat: 1900; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 1,3; Gruix: 0,04) • <i>Replè compactat de material adequat</i> (Densitat: 1125; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,55; Gruix: 0,12) • <i>Cairó ceràmic</i> (Densitat: 1950; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,69; Gruix: 0,03)
	B	Forjat unidireccional de bigues de formigó precomprimit i revoltons ceràmics: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Paviment de rajola ceràmica</i> (Densitat: 2000; Capacitat tèrmica: 0,8; Conductivitat tèrmica: 1,0; Gruix: 0,03) • <i>Morter de ciment</i> (Densitat: 1900; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 1,3; Gruix: 0,04) • <i>Cairó ceràmic</i> (Densitat: 2000; Capacitat tèrmica: 0,8; Conductivitat tèrmica: 1,0; Gruix: 0,03) • <i>Replè compactat de material adequat</i> (Densitat: 1125; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,55; Gruix: 0,12) • <i>Cairó ceràmic</i> (Densitat: 1950; Capacitat tèrmica: 1,0; Conductivitat tèrmica: 0,69; Gruix: 0,03)
	C	Forjat unidireccional de formigó armat, semibiguetes, revoltó de formigó, morter i paviment de gres. (U = 1,59 W/m².K)
	D	Forjat unidireccional de formigó armat, semibiguetes, revoltó de formigó, morter i paviment gres. (U = 2,07 W/m².K)
	E	Valor límit: U = 0,20 W.m².K
	<hr/>	
Finestres	A	Fusteria de fusta i vidre simple de 4 mm. <ul style="list-style-type: none"> • Fusteria: U = 2,2 W/m².K
	B	<ul style="list-style-type: none"> • Vidre: U = 5,7 W/m².K
	C	Fusteria de perfils d'alumini SRPT (sense ruptura de pont tèrmic) i doble envidrament amb cambra d'aire (4/6/4). <ul style="list-style-type: none"> • Fusteria: U = 5,7 W/m².K • Vidre: U = 3,3 W/m².K
	D	Fusteria de perfils d'alumini SRPT (sense ruptura de pont tèrmic) i doble envidrament amb cambra d'aire (4/12/4). <ul style="list-style-type: none"> • Fusteria: U = 5,7 W/m².K • Vidre: U = 2,8 W/m².K
	E	Valor límit fusteria i vidre: U = 1,30 W.m².K

* Densitat en kg/m³, Capacitat tèrmica en KJ/kg.K, Conductivitat tèrmica en W/m.K i Gruix en m

Taula 2.2. Descripció i propietats tèrmiques dels elements arquitectònics segons període constructiu
 Font. Elaboració pròpia amb dades de COAA & SaAs (2012), ICAEN (2013) i Govern d'Andorra (2010)

- **Infiltracions**

Degut a la seva relació amb els elements que componen l'embolcall dels edificis, les infiltracions en l'UBEM d'Escaldes-Engordany també s'han definit per períodes constructius. Aquestes s'han determinat a partir la informació continguda en la tesi doctoral *Airtightness performance of the building envelope of dwellings in Spain. Characterisation and energy impact of air infiltration* (Poza-Casado, 2021) emmarcada en el projecte de recerca INFILES^{2.22}. En aquesta, i amb l'objectiu de cobrir el buit de coneixement relacionat amb l'hermeticitat dels edificis, s'ha constituït una base de dades d'infiltracions d'una mostra representativa del parc edificat espanyol segons zona climàtica, tipologia edificatòria i any de construcció. Per crear-la, Poza-Casado (2021) duu a terme un treball de camp exhaustiu durant el qual es van realitzar proves d'estanqueïtat en 411 habitatges mitjançant el mètode *Blower door test*. Amb l'objectiu de mitigar l'acció del vent i la temperatura sobre l'embolcall, per realitzar les proves d'estanqueïtat es van sotmetre els habitatges a condicions de pressió anormals generant un diferencial de pressió de 50 Pa, lluny dels valors normals situats entre 1-4 Pa (Jesús et al., 2018).

Per tal d'obtenir els valors d'infiltracions per a l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'han ajustat els valors en base al diferencial de pressió corresponent a Escaldes-Engordany. El diferencial de pressió mitjà a es calcula aplicant l'Eq. 2.1 i considerant una velocitat mitjana del vent de 2,19 m/s obtinguda a partir del fitxer climàtic d'Escaldes-Engordany (Capítol 2 secció 2.2.2).

$$\Delta p_w = \frac{1}{2} \cdot d \cdot v \quad (2.1)$$

On:

Δp_w	diferència de pressió (Pa)
d	densitat (kg/m ³)
v	velocitat del vent (m/s)

Amb les dades detallades i l'Eq. 2.1 s'obté un diferencial de pressió mitjà d'Escaldes-Engordany de 2,88 Pa, valor dins dels rang de pressions en circumstàncies ambientals normals. Aquest valor de diferencial de pressió s'ha utilitzat per calcular el cabal d'aire

^{2.22} El projecte INFILES, *Repercusión energética de la permeabilidad del aire de los edificios residenciales en España*, coordinat pel grup d'investigació *Arquitectura y Energía* de la Universitat de Valladolid, és un projecte d'investigació finançat pel Ministeri d'Economia i Competitivitat (BIA2015-64321-R) que busca conèixer l'hermeticitat de l'embolcall arquitectònica en el sector residencial espanyol amb l'objectiu d'adaptar la normativa actual per millorar les condicions de confort dels habitatges.

infiltrat (V_{env}) mitjançant l'Eq. 2.2 i utilitzant els valors de C_{env} i n obtinguts de les proves d'estanqueïtat realitzades per Poza-Casado (2021) i recopilades en l'Annex III del llibre *Permeabilidad al aire de los edificios residenciales en España. Estudio y caracterización de sus infiltraciones* (Feijó Muñoz et al., 2019). Val a dir que per similitud amb les condicions climàtiques amb el Principat d'Andorra, tant sols s'han tingut en compte les proves d'estanqueïtat realitzades en clima continental.

$$V_{env} = C_{env} \cdot (\Delta p^n) \quad (2.2)$$

On:

- V_{env} cabal d'aire infiltrat per l'embolcall (m^3/h)
- C_{env} coeficient del flux d'aire
- Δp diferencial de pressió (Pa)
- n exponent del flux d'aire

Finalment, amb els valors calculats del cabal d'aire infiltrat (V_{env}), s'han determinat les infiltracions aplicant l'Eq. 2.3.

$$ACH = \frac{V_{env}}{V} \quad (2.3)$$

On:

- ACH infiltracions (h^{-1})
- V_{env} cabal d'aire infiltrat per l'embolcall (m^3/h)
- V volum de l'habitatge (m^3)

La informació de les proves d'estanqueïtat utilitzada, així com el càlcul del cabal d'aire infiltrat i de les infiltracions per al diferencial de pressió determinat per Escaldes-Engordany es detallen en l'Annex D. La Taula 2.3 mostra les infiltracions definides a partir de les mitjanes de les infiltracions per període constructiu i tipologia edificatòria descartant els valors anòmals. Val a dir que per al període E, així com el període A de la tipologia unifamiliar s'han assignat els valors del període D i B respectivament ja que no s'han realitzat proves d'estanqueïtat per aquests conjunts d'edificis.

	Període A	Període B	Període C	Període D	Període E
Edificis plurifamiliars	0,82	0,84	1,03	1,05	1,05
Edificis unifamiliars	0,98	0,98	0,85	0,71	0,71

Taula 2.3. Infiltracions en h^{-1} considerades en l'UBEM d'Escaldes-Engordany segons la tipologia edificatòria i el període constructiu

Font. Elaboració pròpia

2.3.3.3 Sistemes de climatització, aparells elèctrics i ús

Les propietats relacionades amb la il·luminació, els sistemes de climatització, els aparells elèctrics, així com els patrons d'utilització d'aquests, s'han establert per cadascun dels vuit clústers resultants de la fragmentació. Tal com es detalla a continuació, les dades s'han extret principalment de les respostes de l'enquesta (veure Annex E), i s'han complementat quan ha sigut necessari amb dades de normatives i de la literatura existent.

Tot i no ser una dada a incloure directament en el model, la superfície dels habitatges és la informació més recurrent per definir les propietats no-geomètriques en ArchSim ja que moltes de les variables necessàries s'han d'introduir en funció d'aquesta.

La informació referent a la superfície s'ha extret del cadastre i s'ha calculat la mitjana de les superfícies de les unitats cadastrals per cadascun dels clústers com mostra la Taula 2.4.

	RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Superfície								
Cadastre (en m²)	111,69	84,09	96,35	82,30	321,43	357,83	314,22	397

Taula 2.4. Superfície mitjana per clúster segons la informació extreta del cadastre

Font. Elaboració pròpia

- **Ocupació**

L'ocupació considerada en l'UBEM és la mitjana de les ocupacions extretes de les enquestes per cadascun dels clústers. Val a dir que durant la realització de l'enquesta es precisava que tant sols es tinguessin en compte les persones amb residència permanent en l'habitatge, descartant fills cursant estudis a l'estranger o familiars vivint temporalment. La Taula 2.5 presenta els valors d'ocupació considerats segons clúster, així com els valors de l'ocupació per superfície, paràmetre d'entrada de l'UBEM.

	RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Ocupació								
Persones (p)	2,31	2,72	2,58	2,46	2,78	2,44	2,3	2
Ocupació (p/m²)	0,021	0,032	0,027	0,030	0,009	0,007	0,007	0,006

Taula 2.5. Valors d'ocupació definits segons clúster

Font. Elaboració pròpia

- **Il·luminació**

Per definir les propietats de la il·luminació de cadascun dels clústers s'han utilitzat les dades de l'enquesta corresponents al nombre i al tipus de làmpada presents en els habitatges, així com els horaris d'utilització d'aquestes. A més, per estimar la potència de la il·luminació dels diferents clústers s'han considerat les següents potències: 60 W per les làmpades incandescents i halògenes, 15 W per les làmpades fluorescent compacte, 14 W per als fluorescents i 7 W per a les làmpades de tipus LED (de l'anglès *Light-emitting diode*). Amb la finalitat de no sobredimensionar la il·luminació, per al càlcul de la potència de la il·luminació de cada clúster, i seguint l'exemple de l'enquesta RECS, s'han considerat tant sols les làmpades que estan en funcionament com a mínim 4 hores al dia i no la totalitat d'elles. A més, pel càlcul de la potència s'han tingut en compte els percentatges de cada tipus de làmpada en un intent de replicar de la manera més precisa possible la realitat del parc edificat en el model.

La Taula 2.6 resumeix les dades extretes de l'enquesta per estimar la potència de la il·luminació, així com la potència total per cadascun dels clústers. Finalment, juntament amb les dades de superfície determinades prèviament, es calculen les potències per superfície, valors utilitzats en la generació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany.

	RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Il·luminació								
Número total de bombetes								
< 10	13%	12%	25%	23%	0%	6%	9%	0%
10 – 24	49%	68%	70%	69%	11%	11%	27%	0%
25 – 39	29%	12%	5%	0%	30%	39%	27%	0%
> 40	9%	8%	0%	8%	60%	44%	36%	100%
Bombetes en funcionament mínim 4 hores al dia	3,8	3,6	4,2	4,7	5	5,7	4,2	10
Tipus de bombetes presents:								
<i>Incandescent</i>	8%	10%	16%	0%	7%	3%	14%	0%
<i>Halògena</i>	20%	22%	16%	19%	12%	10%	2%	0%
<i>Fluorescent compacta</i>	19%	18%	47%	50%	12%	6%	14%	0%
<i>Fluorescent</i>	9%	3%	5%	6%	5%	7%	5%	0%
<i>LED</i>	44%	47%	16%	25%	64%	74%	66%	100%
Potència total estimada (W)	91,04	92	117,88	100,46	92,23	85,50	70,73	70,00
Potència per superfície (W/m²)	0,82	1,09	1,22	1,22	0,29	0,24	0,23	0,18

Taula 2.6. Resum de les dades de les enquestes utilitzades per estimar la potència de la il·luminació, així com les potències estimades segons clúster

Font. Elaboració pròpia

Pel que fa a la utilització, la Figura 2.22 mostra els horaris establerts mitjançant les respostes de les enquestes per cadascun dels clústers tant per als dies laborables, com pels caps de setmana. Per cada franja horària es presenta la proporció entre 0 i 1 dels habitatges que utilitzen la il·luminació per cadascun dels arquetips.

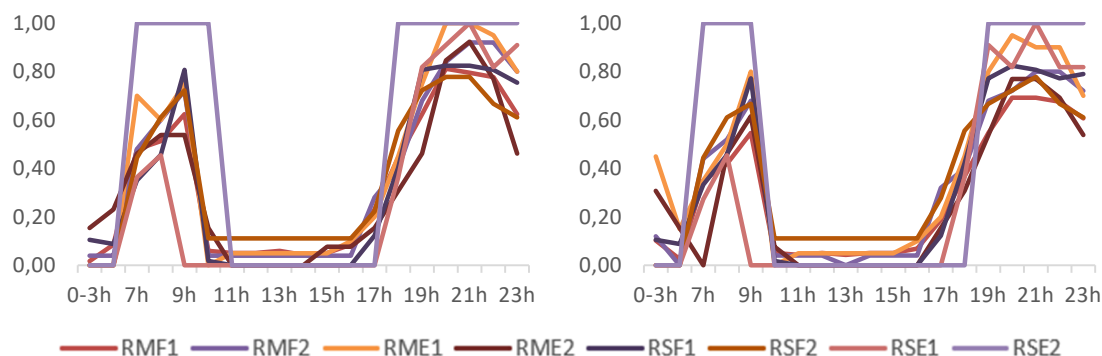


Figura 2.22. Horaris d'utilització de la il·luminació en dies laborables (dreta) i en caps de setmana (esquerra) segons clúster

Font. Elaboració pròpia

Val a dir que l'horari d'utilització de la il·luminació també s'ha utilitzat per l'ocupació ja que aquest no es va demanar en l'enquesta per tractar-se d'una informació sensible en termes de privacitat.

- **Aparells elèctrics**

Obtenir un llistat detallat dels aparells elèctrics presents en les llars amb les seves respectives propietats és una tasca molt àrdua de realitzar degut a la gran varietat d'aparells existents. Per definir les propietats dels diferents aparells elèctrics presents en les llars, aquests s'han tractat en dos grups diferenciats. D'una banda, els grans aparells elèctrics, que engloben la cuina, el refrigerador, la rentadora, l'assecadora, el rentavaixelles i la televisió. D'altra banda, els petits aparells elèctrics que inclouen aparells de cuina o neteja com la cafetera, la torradora o l'aspiradora, així com també altres aparells relacionats amb les TIC (Tecnologies de la Informació i Comunicació) com per exemple ordinadors, telèfons, o routers. El motiu d'aquesta divisió es deu principalment a la informació que s'ha pogut extreure mitjançant l'enquesta, així com perquè els grans aparells elèctrics són els que més consumeixen en les llars. És important destacar que tot i que generalment la cuina es tracta de manera independent de la resta d'electrodomèstics i aparells elèctrics, degut a la gran

penetració elèctrica en els habitatges andorrans, s’estima en un 97,4% segons Travesset-Baro (2017), en l’UBEM d’Escaldes-Engordany aquesta s’ha considerat com un electrodomèstic.

Detallades en la Taula 2.7, les propietats dels diferents aparells elèctrics s’han definit a partir de les dades de l’enquesta relacionades amb el tipus, pel qual s’ha considerat la casuística majoritària, i l’antiguitat, per la qual s’han tingut en compte els percentatges de cada franja d’antiguitat. Val a dir que tot i haver sigut una dada de gran rellevància per estimar les potències dels diferents electrodomèstics, els resultats de les enquestes evidencien que hi ha un gran desconeixement sobre l’etiqueta energètica d’aquests (veure Annex E).

	RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2					
Grans aparells elèctrics													
Cuina													
Tipus	Vitroceràmica												
Antiguitat (en anys)	< 2	22%	50%	25%	50%	19%	19%	0%	0%				
	2 – 4	12%	25%	13%	25%	10%	0%	0%	0%				
	5 – 9	26%	0%	38%	0%	17%	31%	57%	100%				
	10 – 14	18%	25%	13%	25%	25%	19%	29%	0%				
	15 – 19	8%	0%	13%	0%	12%	25%	0%	0%				
	> 20	14%	0%	0%	0%	17%	6%	14%	0%				
Frigorífic i congelador													
Situació	Junts en únic electrodomèstic												
Antiguitat (en anys)	< 2	23%	24%	5%	18%	30%	18%	20%	100%				
	2 – 4	21%	19%	42%	36%	20%	18%	20%	0%				
	5 – 9	19%	33%	32%	9%	10%	18%	20%	0%				
	10 – 14	23%	20%	16%	18%	15%	18%	0%	0%				
	15 – 19	6%	5%	5%	18%	10%	18%	20%	0%				
	> 20	8%	0%	0%	0%	15%	9%	20%	0%				
Rentadora i assecadora													
Situació	Només rentadora				Rentadora i Assecadora en 2 electrodomèstics								
Antiguitat (en anys)	< 2	9%	25%	29%	44%	19%	11%	20%	27%	0%	25%	100%	100%
	2 – 4	25%	19%	21%	33%	14%	5%	20%	33%	14%	13%	0%	0%
	5 – 9	34%	25%	43%	11%	27%	27%	40%	27%	57%	38%	0%	0%
	10 – 14	22%	6%	7%	11%	19%	27%	13%	7%	14%	13%	0%	0%
	15 – 19	5%	0%	0%	0%	8%	8%	7%	0%	14%	0%	0%	0%
	> 20	5%	25%	0%	0%	14%	22%	0%	7%	0%	13%	0%	0%

Rentavaixelles									
Situació		Disposa		No disposa		Disposa			
Antiguitat (en anys)	< 2	22%	31%			8%	13%	13%	0%
	2 – 4	15%	8%			15%	6%	13%	0%
	5 – 9	19%	38%			23%	44%	50%	100%
	10 – 14	27%	23%	-	-	25%	19%	25%	0%
	15 – 19	3%	0%			13%	13%	0%	0%
	> 20	15%	0%			17%	6%	0%	0%
Televisor									
Dimensions (en polzades)		40-59							
Tipus pantalla		Plana							
Antiguitat (en anys)	< 2	28%	36%	44%	33%	20%	11%	30%	0%
	2 – 4	26%	24%	39%	33%	21%	28%	10%	0%
	5 – 9	29%	28%	11%	25%	30%	44%	40%	100%
	10 – 14	13%	12%	6%	8%	23%	11%	10%	0%
	15 – 19	3%	0%	0%	0%	4%	0%	10%	0%
	> 20	2%	0%	0%	0%	2%	6%	0%	0%

Taula 2.7. Informació dels grans aparells elèctrics extrets de l'enquesta segons el clúster

Font. Elaboració pròpia

Per establir la potència de cadascun dels grans aparells elèctrics s'han considerat els consums d'energia final anual dels diferents electrodomèstics a França (Enerdata, 2022)^{2,23}, així com les hores d'utilització més habituals considerades en Maña, Cuchí, Díez, & Orgaz, (2002) detallats en la Taula F.1 i la Taula F.2 de l'Annex F. Igual que en el cas de la il·luminació, per transferir les respostes de les enquestes en el model de la manera més precisa possible, s'han tingut en compte els percentatges de cada franja d'antiguitat en el càlcul de les potències. En el cas dels petits electrodomèstics s'ha considerat el valor de 3501,11 kWh corresponent al consum anual dels petits electrodomèstics a França l'any 2019 (Enerdata, 2022), així com una utilització constant durant tot l'any. La Taula 2.8 mostra les potències calculades tant pels grans com pels petits aparells elèctrics, les potències totals per cadascun dels clústers així com les potències per superfície de cada clúster, paràmetre d'entrada de l'UBEM.

^{2,23} El projecte ODYSSEE-MURE realitza un monitoratge de la tendència de l'eficiència energètica i les mesures aplicades en relació a aquesta a la UE

	RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Grans aparells elèctrics								
Cuina								
Potència (en W)	892,53	844,22	873,00	844,22	919,07	905,27	885,10	807,06
Frigorífic								
Potència (en W)	38,94	38,39	38,05	38,27	39,35	39,67	40,50	34,01
Rentadora								
Potència (en W)	720,42	724,39	686,82	663,47	738,21	704,24	723,38	635,37
Assecadora								
Potència (en W)	-	-	-	-	1852,22	1879,74	1889,26	1852,21
Rentavaixelles								
Potència (en W)	762,43	724,71	-	-	785,86	767,35	745,52	740,07
Televisió								
Potència (en W)	107,01	107,86	108,00	106,88	105,32	105,59	104,11	108,14
Petits aparells elèctrics								
Potència (en W)	195,76	195,76	195,76	195,76	195,76	195,76	195,76	195,76
Potència total estimada (W)	2717,10	2635,34	1901,64	1848,60	4635,78	4588,61	4583,63	4372,64
Potència per superfície (W/m ²)	24,33	31,34	19,74	22,46	14,42	12,82	14,59	11,01

Taula 2.8. Potències definides en l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia a partir de la base de dades ODYSEE (França) i Maña et al. (2002)

Pel que fa a l'ús dels aparells elèctrics, la Figura 2.23 presenta els horaris d'utilització establerts en base a les respostes de les enquestes per cadascun dels electrodomèstics que componen els grans aparells elèctrics, tant en dies laborables, com en caps de setmana. Igual que per la il·luminació, per cada franja horària es presenta la proporció entre 0 i 1 dels habitatges que utilitzen els diferents aparells elèctrics per cada clúster.

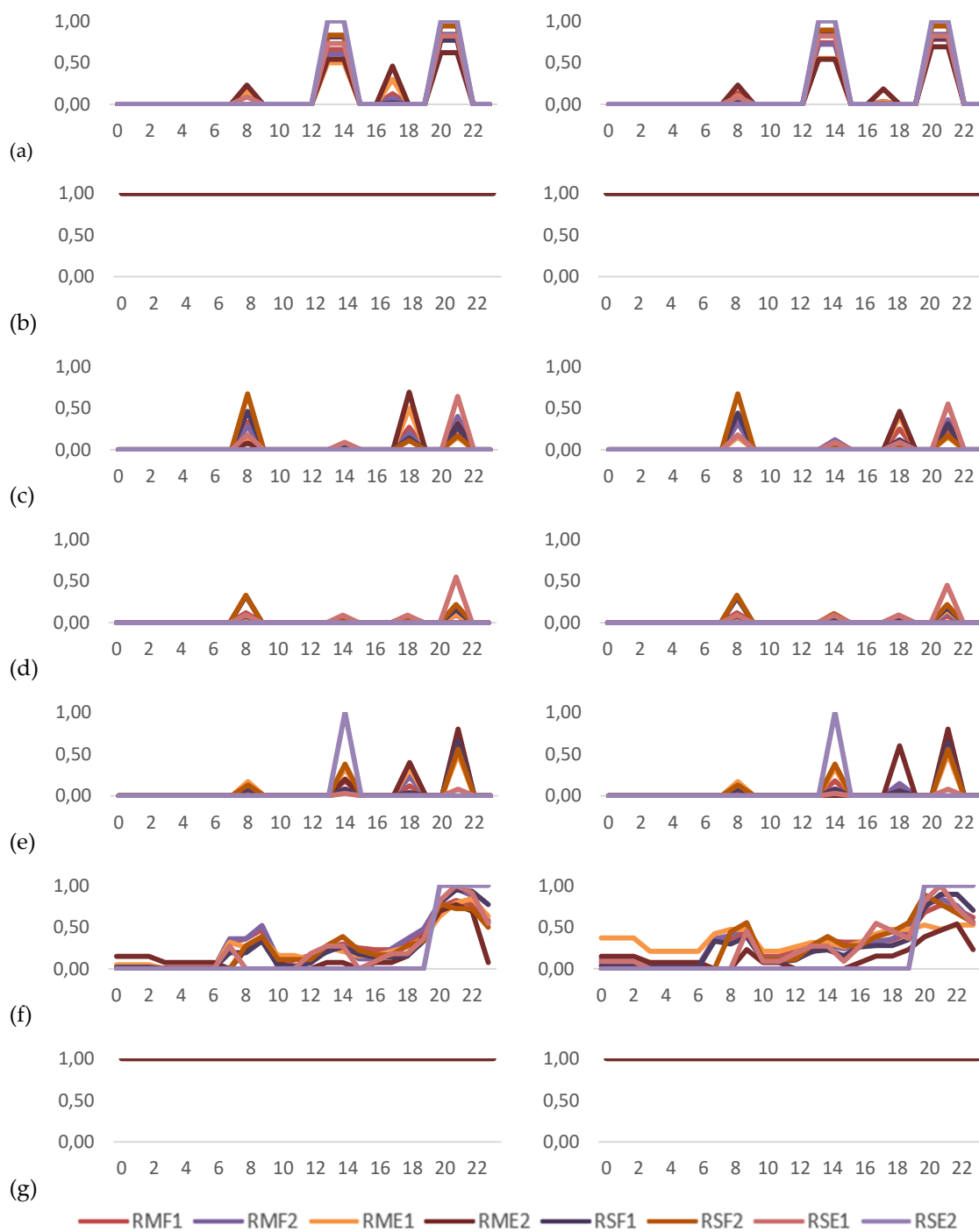


Figura 2.23. Horaris d'utilització dels equips considerats: (a) cuina, (b) frigorífic, (c) rentadora, (d) assecadora, (e) rentavaixelles, (f) televisió, (g) petits aparells elèctrics, en dies laborables (dreta) i en caps de setmana (esquerra) segons clúster

Font. Elaboració pròpia

En el cas dels aparells elèctrics, l'altre aspecte a tenir en compte en la utilització és el tipus d'ús. Alguns equipaments tenen un ús constant, com és el cas del refrigerador, d'altres tenen un ús diari, com és el cas de la televisió o la cuina, i d'altres s'utilitzen de manera irregular o esporàdica, és a dir alguns dies de la setmana, com és el cas de la rentadora, l'assecadora i el rentavaixelles. La Taula 2.9 presenta el tipus d'ús dels diferents equips elèctrics obtinguts de l'enquesta, així com els usos setmanals dels equipaments d'ús irregular.

	RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Electrodomèstics								
Cuina								
Usos setmanals	diari	diari	diari	diari	diari	diari	diari	diari
Refrigerador								
Usos setmanals	Constant	Constant	Constant	Constant	Constant	Constant	Constant	Constant
Rentadora								
Usos setmanals	3,6	3,7	4,2	4,6	3,7	3,8	2,7	6
Assecadora								
Usos setmanals	-	-	-	-	2,3	2,5	2,5	6
Rentavaixelles								
Usos setmanals	4,5	4,3	-	-	3,9	5,3	3,7	3
Televisió								
Usos setmanals	diari	diari	diari	diari	diari	diari	diari	diari

Taula 2.9. Ús setmanal en dies dels equipaments considerats en l'enquesta per clúster

Font. Elaboració pròpia

- **Calefacció**

Les dades utilitzades per caracteritzar els sistemes de calefacció també s'han extret de les enquestes. Aquestes consisteixen principalment en la informació corresponent a la temperatura de consigna del termòstat, així com als horaris de programació d'aquest. La Taula 2.10 mostra les principals característiques del sistema de calefacció per cadascun dels vuit clústers, així com la temperatura d'aquesta durant el dia i durant la nit. Val a dir que, tot i que per definir el sistema de calefacció en el model no es necessària la informació referent a l'equip de producció de calefacció ni a l'antiguitat d'aquests ja que el model calcula la demanda energètica, aquestes dades es requereixen a posteriori per tal d'estimar el consum aplicant els rendiments de cadascun dels equips de producció.

		RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Sistema de calefacció									
Equip de producció		Caldera fuel domèstic	Caldera fuel domèstic	Radiadors elèctric	Radiador elèctric	Caldera fuel domèstic	Caldera fuel domèstic	Aerotèrmia	Aerotèrmia
Antiguitat (en anys)	< 2	12%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%
	2 - 4	4%	17%	0%	100%	4%	8%	25%	0%
	5 - 9	8%	17%	67%	0%	11%	17%	75%	100%
	10 - 14	20%	17%	0%	0%	7%	25%	0%	0%
	15 - 19	12%	33%	0%	0%	24%	17%	0%	0%
	> 20	45%	17%	33%	0%	52%	33%	0%	0%
Temperatura termòstat	Dia	19,83	19,14	16,62	19,48	19,80	20,21	20,09	21
	Nit	18,70	19,96	18,90	18,97	18,52	18,65	18,33	21

Taula 2.10. Resum de les propietats del sistema de calefacció segons clúster

Font. Elaboració pròpia amb dades de l'enquesta

Referent a la utilització, la Figura 2.24 mostra per cada franja horària la proporció entre 0 i 1 dels habitatges que utilitzen la calefacció segons les dades extretes de l'enquesta per cada clúster en dies laborables i caps de setmana.

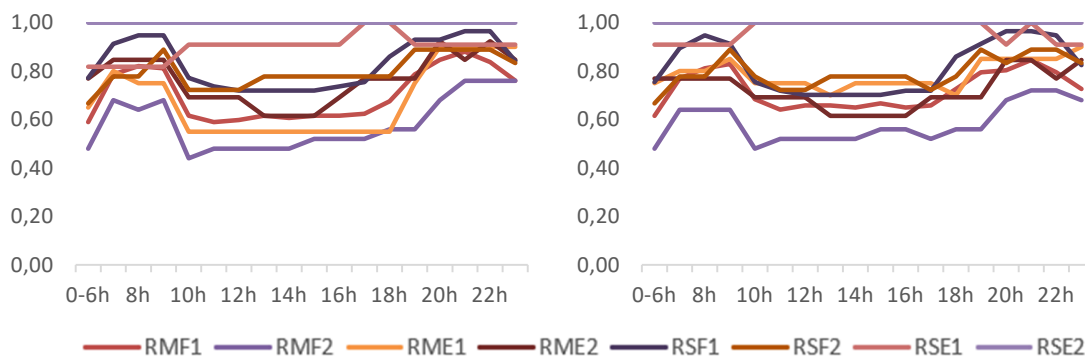


Figura 2.24. Horaris d'utilització del sistema de calefacció en dies laborables (dreta) i en caps de setmana (esquerra) segons clúster

Font. Elaboració pròpia

En la utilització de la calefacció s'han tingut en compte els mesos de l'any durant els quals està en funcionament ja que aquesta té un ús estacionari. La Figura 2.25 mostra per cada mes la proporció entre 0 i 1 dels habitatges enquestats que utilitzen la calefacció. De manera general, el sistema de calefacció està actiu d'octubre a març, i en menor mesura també durant els mesos d'abril i setembre, considerats com mesos de transició.

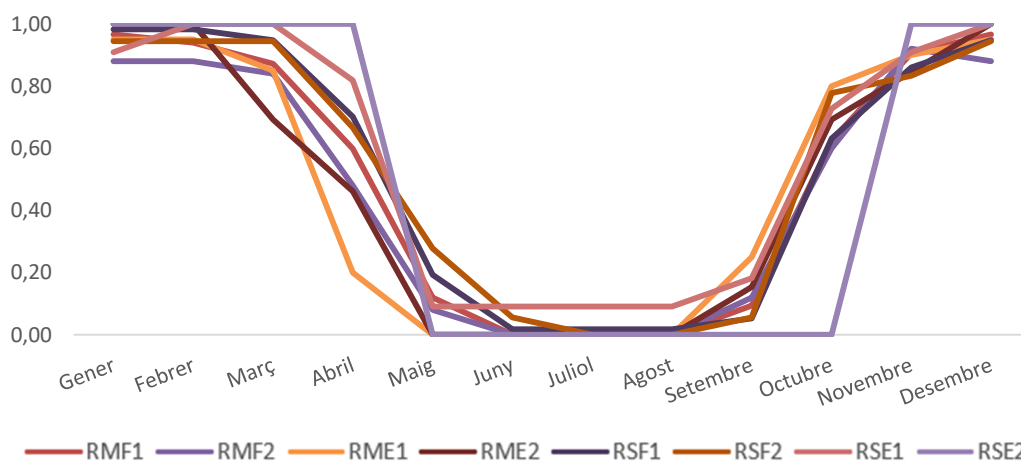


Figura 2.25. Utilització del sistema de calefacció al llarg de l’any segons clúster

Font. Elaboració pròpia

Per tal de representar la utilització de la calefacció s’ha considerat que el sistema està en ús d’octubre a març i pels mesos de transició s’han calculat els dies corresponents a la proporció dels habitatges que utilitzen la calefacció durant aquests mesos a partir de les dades extretes de les enquestes. La Taula 2.11 mostra els dies per cada mes de l’any durant els quals el sistema de calefacció es considera que està en funcionament per cadascun dels vuit clústers.

	RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Sistema de calefacció								
Gener	31	31	31	31	31	31	31	31
Febrer	28	28	28	28	28	28	28	28
Març	31	31	31	31	31	31	31	31
Abril	18	14	6	14	21	20	26	30
Maig	0	0	0	0	0	0	0	0
Juny	0	0	0	0	0	0	0	0
Juliol	0	0	0	0	0	0	0	0
Agost	0	0	0	0	0	0	0	0
Setembre	3	4	8	5	2	2	6	0
Octubre	31	31	31	31	31	31	31	31
Novembre	30	30	30	30	30	30	30	30
Desembre	31	31	31	31	31	31	31	31

Taula 2.11. Dies al mes durant els quals es considera activa la calefacció segons el clúster

Font. Elaboració pròpia

- **Refrigeració**

Degut a les condicions climatològiques, els sistemes de refrigeració són poc freqüents en el sector residencial en zones de muntanya com és el cas del Principat d'Andorra. Tot i haver detectat mitjançant la realització de l'enquesta la presència de sistemes de refrigeració en alguns habitatges, més concretament el 7% dels habitatges enquestats, aquest no s'ha considerat en l'UBEM d'Escaldes-Engordany.

- **Aigua calenta sanitària**

En el cas de l'ACS, les dades utilitzades per definir les seves propietats s'han extret principalment del Reglament energètic en l'edificació (Govern d'Andorra, 2010). Presentades en la Taula 2.12, aquestes consisteixen en el consum d'ACS i la temperatura d'ús de l'aigua. A diferència dels casos anteriors, les dades d'ACS s'han obtingut per tipologia d'edifici, plurifamiliar i unifamiliar, pel que fa al consum, i un únic valor igual per tots els clústers pel que fa a la temperatura d'ús de l'ACS.

	RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Consum (litres/persona)	22				30			
Temperatura d'ús de l'ACS (en °C)	60							

Taula 2.12. Consum i temperatura d'ús de l'ACS

Font. Elaboració pròpia amb dades de Govern d'Andorra (2010)

Per als valors de temperatura de l'aigua de xarxa s'han considerat els utilitzats per Travesset-Baro (2017) facilitats pel Laboratori de Control del Comú d'Andorra la Vella (veure Taula 2.13), parròquia fronterera amb Escaldes-Engordany.

Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre
2	3	4	5	6	7	8	9	7	5	3	2

Taula 2.13. Temperatura de l'aigua (en °C) de la xarxa de subministrament l'any 2012

Font. Travesset-Baro (2017)

Pel que fa a la utilització de l'ACS, les dades establertes s'han extret de les enquestes. La Figura 2.26 mostra, per cada franja horària, la proporció entre 0 i 1 dels habitatges que utilitzen l'ACS per cada clúster en dies laborables i caps de setmana.

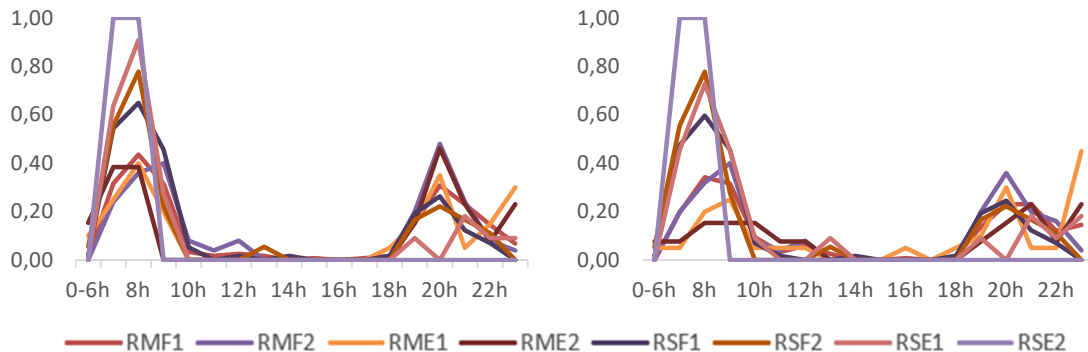


Figura 2.26. Horaris d'utilització del sistema d'ACS en dies laborables (dreta) i en caps de setmana (esquerra) segons clúster

Font. Elaboració pròpia

2.4 Referències

- Ali, U., Shamsi, M. H., Donnell, J. O., & Alshehri, F. (2018). Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms for Building Archetypes Development in Urban Energy Modeling. *Building Performance Modeling Conference and SimBuild, December*.
- Arambula Lara, R., Cappelletti, F., Romagnoni, P., & Gasparella, A. (2014). Selection of Representative Buildings through Preliminary Cluster Analysis. *International High Performance Buildings Conference*. <http://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/137>
- Ballarini, I., Corgnati, S. P., & Corrado, V. (2014). Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. *Energy Policy*, 68, 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.027>
- Batalla, M., Ninyerola, M., Trapero, L., & Esteban, P. (2016). ACDA: *Atles climàtic digital d'Andorra (període 1981-2010)*. Servidor de mapes. Institut d'Estudis Andorrans (IEA), Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). <http://www.acda.ad>
- Ben-Dor, A., Shamir, R., & Yakhini, Z. (1999). Clustering gene expression patterns. *Journal of Computational Biology*, 6(3–4), 281–297. <https://www.liebertpub.com/action/showCitFormats?doi=10.1089%2F106652799318274>
- Biljecki, F. (2013). The concept of level of detail in 3D city models. In *PhD Research Proposal, Delft University: Vol. II (Issue 62)*. <http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:cea5a207-e796-4691-9440-13362cf8654c/291180.pdf>

- Biljecki, F., Ledoux, H., & Stoter, J. (2016). An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59, 25–37. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005>
- Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A. (2015). Applications of 3D city models: State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2842–2889. <https://doi.org/10.3390/ijgi4042842>
- BOPA 29/2008. (2008). *Llei 29/2008, de l'11 de desembre, del cadastre*.
- Borges, P., Pages-Ramon, A., & Travesset-Baro, O. (2021). Modelización energética del parque edificado a escala urbana: encuestas como complemento a los datos catastrales en la fase de caracterización. *CienciAmérica*, 10(3), 41–56. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i3.370>
- Borges, P., Travesset-Baro, O., & Pages-Ramon, A. (2022). Hybrid approach to representative building archetypes development for urban models – A case study in Andorra. *Building and Environment*, 215(January), 108958. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108958>
- Branco, G., Lachal, B., Gallinelli, P., & Weber, W. (2004). Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data. *Energy and Buildings*, 36(6), 543–555. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.028>
- Buffat, R., Froemelt, A., Heeren, N., Raubal, M., & Hellweg, S. (2017). Big data GIS analysis for novel approaches in building stock modelling. *Applied Energy*, 208(October), 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.041>
- Caputo, P., Costa, G., & Ferrari, S. (2013). A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Energy Policy*, 55, 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.006>
- Cerezo, C., Sokol, J., AlKhaled, S., Reinhart, C., Al-Mumin, A., & Hajiah, A. (2017). Comparison of four building archetype characterization methods in urban building energy modeling (UBEM): A residential case study in Kuwait City. *Energy and Buildings*, 154, 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.029>
- Cerezo Davila, C., Reinhart, C. F., & Bemis, J. L. (2016). Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets. *Energy*, 117, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.057>

- COAA, & SaAS. (2012). *Quantificació del potencial d'eficiència energètica en el sector de l'edificació a Andorra (informe no públic)*.
- Corgnati, S. P., Fabrizio, E., Filippi, M., & Monetti, V. (2013). Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application. *Applied Energy*, 102, 983–993. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.001>
- Dall'ò, G., Galante, A., & Torri, M. (2012). A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy and Buildings*, 48, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.034>
- Dascalaki, E. G., Droutsas, K. G., Balaras, C. A., & Kontoyiannidis, S. (2011). Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings - A case study for the Hellenic building stock. *Energy and Buildings*, 43(12), 3400–3409. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.002>
- Dogan, T. (2013). *ArchSim Energy Modeling*. <https://tkdogan.gitbooks.io/archsim-primer/content/WhatIsThisAbout.html>
- Douglas, D. H., & Peucker, T. K. (1973). Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required To Represent a Digitized Line or Its Caricature. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 10(2), 112–122. <https://doi.org/10.3138/fm57-6770-u75u-7727>
- Enerdata. (2022). *ODYSSEE database on energy efficiency data & indicators*. <https://www.indicators.odyssee-mure.eu/energy-efficiency-database.html>
- Escobar Villanueva, J. R. (2020). Contribuciones metodológicas para la obtención de información altimétrica requerida en la evaluación local de amenazas por inundaciones a partir de nuevas tecnologías geoespaciales. In *Universidad Politécnica de Madrid* (Issue March). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.58112>
- Famuyibo, A. A., Duffy, A., & Strachan, P. (2012). Developing archetypes for domestic dwellings - An Irish case study. *Energy and Buildings*, 50, 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.033>
- Feijó Muñoz, J., Meiss, A., Poza Casado, I., Padilla Marcos, M. Á., Rabanillo Herrero, M., Royuela del Val, A., Dios Viéitez, M. J., Echarri Iribarren, V., Pardal March, C., del Campo Díaz, V. J., & González Lezcano, R. A. (2019). Anexo III. Informes de ensayo. In *Permeabilidad al aire de los edificios residenciales en España. Estudio y caracterización de sus infiltraciones* (Ediciones, pp. 191–1017).
- Ferràs Calvo, A. (2014). *Desarrollo de un plug-in de simplificación de geometrías con restricciones para QGIS*.

- Filogamo, L., Peri, G., Rizzo, G., & Giaccone, A. (2014). On the classification of large residential buildings stocks by sample typologies for energy planning purposes. *Applied Energy*, 135, 825–835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.002>
- Firth, S. K., & Lomas, K. J. (2009). Investigating CO2 emission reductions in existing urban housing using a community domestic energy model. *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, 2098–2105.
- Fracastoro, G. V., & Serraino, M. (2011). A methodology for assessing the energy performance of large scale building stocks and possible applications. *Energy and Buildings*, 43(4), 844–852. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.004>
- Gianniou, P., Liu, X., Heller, A., Nielsen, P. S., & Rode, C. (2018). Clustering-based analysis for residential district heating data. *Energy Conversion and Management*, 165(December 2017), 840–850. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.015>
- Godoy-Shimizu, D., Palmer, J., & Terry, N. (2014). What can we learn from the household electricity survey? *Buildings*, 4(4), 737–761. <https://doi.org/10.3390/buildings4040737>
- González Crespo, R., Lorenzo Romero, W., Sanjuan Martínez, O., & Montenegro-Marín, C. E. (2014). Design and Modeling to Generalized Linear Elements in a Vector Formatted Cartographic. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 6(3), 96–108.
- Govern d'Andorra. (2010). *Reglament energètic en l'edificació*.
- Guha, S., Rastogi, R., & Shim, K. (1998). CURE: An efficient clustering algorithm for large databases. *ACM Sigmod Rec*, 27(2), 73–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.1145/276305.276312>
- Hall, I. J., Prairie, R. R., Anderson, H. E., & Boes, E. C. (1978). Generation of a typical meteorological year. *Proceedings of the 1978 Annual Meeting of the American Section of the International Solar Energy Society*, 669–671.
- Honsberg, C. B., & Bowden, S. G. (2019). *Photovoltaics Education Website*. Typical Meteorological Year Data (TMY). <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/typical-meteorological-year-data-tmy>
- Huld, T., Pinedo, I., Gracia, A., Urraca, R., & Dunlop, E. (2017). PVGIS version 5: Improvements to models and features. *European PV Solar Energy Conference*, 2069–2074.
- ICAEN. (2013). *Estudi sobre la rendibilitat econòmica i idoneïtat de diferents tecnologies energèticament eficients a diferents tipologies d'edificis del sector residencial. Annex 2: Caracterització de les tipologies edificatòries*.

http://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/04_coleccio_QuadernPractic/quadern_practic/arxiu/10_rehabilitacio_edificis_Annex2.pdf

- Jesús, F. M., Irene, P. C., Alonso, G. L. R., Cristina, P., Víctor, E., De Larriva Rafael, A., Jesica, F. A., Jesús, D. V. M., José, D. C. D. V., Manuel, M. C., Ángel, P. M. M., & Alberto, M. (2018). Methodology for the study of the envelope airtightness of residential buildings in Spain: A case study. *Energies*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/en11040704>
- Johari, F., Peronato, G., Sadeghian, P., Zhao, X., & Widén, J. (2020). Urban building energy modeling: State of the art and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128(April). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109902>
- Li, H., Huang, J., Hu, Y., Wang, S., Liu, J., & Yang, L. (2021). A new TMY generation method based on the entropy-based TOPSIS theory for different climatic zones in China. *Energy*, 231, 120723. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120723>
- Majcen, D., Itard, L. C. M., & Visscher, H. (2013). Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications. *Energy Policy*, 54, 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.11.008>
- Maña, F., Cuchí, A., Díez, B., & Orgaz, T. (2002). *La coberta captadora als edificis d'habittages: Línia de la construcció i les noves exigències*.
- Marion, W., & Urban, K. (1995). *User's Manual for TMY2s: Derived from the 1961-1990 National Solar Radiation Data Base* (Issue D). <https://www.osti.gov/biblio/87130>
- Mastrucci, A., Baume, O., Stazi, F., & Leopold, U. (2014). Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city: A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam. *Energy and Buildings*, 75, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.032>
- Mata, É., Sasic Kalagasidis, A., & Johnsson, F. (2014). Building-stock aggregation through archetype buildings: France, Germany, Spain and the UK. *Building and Environment*, 81, 270–282. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.013>
- Mavrogianni, A., Davies, M., Kolokotroni, M., & Hamilton, I. (2009). A gis-based bottom-up space heating demand model of the london domestic stock. *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, 1061–1067.
- Nouvel, R., Zirak, M., Coors, V., & Eicker, U. (2017). The influence of data quality on urban heating demand modeling using 3D city models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.12.005>
- Nunes, D. J. (2013). *Institut Cartogràfic de Catalunya*. Model Digital d'elevacions. <https://www.icgc.cat/Ciutada/Informa-t/Diccionaris/Model-digital-d-elevacions>

- Oraopoulos, A., & Howard, B. (2022). On the accuracy of Urban Building Energy Modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158(March 2021), 111976. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111976>
- Österbring, M., Mata, É., Thuvander, L., Mangold, M., Johnsson, F., & Wallbaum, H. (2016). A differentiated description of building-stocks for a georeferenced urban bottom-up building-stock model. *Energy and Buildings*, 120, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.060>
- Perez, D. (2014). A framework to model and simulate the disaggregated energy flows supplying buildings in urban areas. In *PhD Thesis* (Vol. 6102). École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Peronato, G. (2019). *Urban planning support based on the photovoltaic potential of buildings: a multi-scenario ranking system* (Thesis N° 9051).
- Poza-Casado, I. (2021). *Airtightness performance of the building envelope of dwellings in Spain. Characterisation and energy impact of air infiltration*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/52115>
- Reinhart, C. F., & Cerezo Davila, C. (2016). Urban building energy modeling - A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- Schaefer, A., & Ghisi, E. (2016). Method for obtaining reference buildings. *Energy and Buildings*, 128, 660–672. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.001>
- Shimoda, Y., Fujii, T., Morikawa, T., & Mizuno, M. (2004). Residential end-use energy simulation at city scale. *Building and Environment*, 39(8 SPEC. ISS.), 959–967. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.020>
- Sokol, J., Cerezo Davila, C., & Reinhart, C. F. (2017). Validation of a Bayesian-based method for defining residential archetypes in urban building energy models. *Energy and Buildings*, 134, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.050>
- Solargis. (2021). *Time series and TMY data - Overview*. <https://solargis.com/es/products/time-series-and-tmy-data/overview>
- Sun, J., Li, Z., Xiao, F., & Xiao, J. (2020). Generation of typical meteorological year for integrated climate based daylight modeling and building energy simulation. *Renewable Energy*, 160, 721–729. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.024>
- Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819–1835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.033>

- Tardioli, G., Kerrigan, R., Oates, M., O'Donnell, J., & Finn, D. P. (2018). Identification of representative buildings and building groups in urban datasets using a novel pre-processing, classification, clustering and predictive modelling approach. *Building and Environment*, 140(February), 90–106. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.035>
- Theodoridou, I., Papadopoulos, A. M., & Hegger, M. (2011). A typological classification of the Greek residential building stock. *Energy and Buildings*, 43(10), 2779–2787. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.036>
- Travesset-Baro, O. (2017). *Prospectiva energètica al Principat d'Andorra. Model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Travesset-Baro, O., Vilella, M., & Borges, P. (2021). Hacia la autosuficiencia energética en las ciudades. análisis del potencial solar fotovoltaico a escala urbana en el Principado de Andorra. *CienciAmérica*, 10(3), 25–40. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i3.369>
- Wang, C., Ferrando, M., Causone, F., Jin, X., Zhou, X., & Shi, X. (2022). Data acquisition for urban building energy modeling: A review. *Building and Environment*, 217(March), 109056. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109056>
- Wang, R., Bach, J., & Ferrie, F. P. (2011). Window detection from mobile LiDAR data. *2011 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, WACV 2011*, 58–65. <https://doi.org/10.1109/WACV.2011.5711484>
- Weather Analytics. (2012). *What are TMY & AMY files?* <http://www.weatheranalytics.com/images/media/>
- Weiler, V., Stave, J., & Eicker, U. (2019). Renewable energy generation scenarios using 3D urban modeling tools—methodology for heat pump and co-generation systems with case study application. *Energies*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/en12030403>
- Yan, W. Y., Shaker, A., & El-Ashmawy, N. (2015). Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review. *Remote Sensing of Environment*, 158(March), 295–310. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.001>
- Yang, X., Qin, X., Wang, J., Wang, J., Ye, X., & Qin, Q. (2015). Building façade recognition using oblique aerial images. *Remote Sensing*, 7(8), 10562–10588. <https://doi.org/10.3390/rs70810562>
- Zinzi, M., Carnielo, E., & Mattoni, B. (2018). On the relation between urban climate and energy performance of buildings. A three-years experience in Rome, Italy. *Applied Energy*, 221(March), 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.192>

3 GENERACIÓ DEL MODEL

El Capítol 3 es centra en la fase de generació dels UBEM detallant el procés de generació realitzat en l'UBEM d'Escaldes-Engordany fins a l'obtenció del model energètic llest per ser simulat. Prèviament, es presenta l'estat de l'art específic d'aquesta fase destacant els dos aspectes a tenir en compte en la generació: l'eina de generació i el tipus de model tèrmic.

3.1 Estat de l'art

Un cop es disposa de totes les dades necessàries del parc edificat objecte d'estudi, aquestes s'han de combinar per tal de crear el model energètic (Reinhart & Cerezo Davila, 2016). És a dir, un model que tingui la capacitat de predir les variacions de demanda o consum d'un edifici, d'una zona tèrmica a una altra, al llarg d'un cert període temporal (IOP, 2019).

Una de les principals diferències entre els models publicats fins a dia d'avui és principalment l'eina de generació utilitzada, tot i que segons Reinhart & Cerezo Davila (2016), els UBEM difereixen també en el tipus i el detall del model, així com en considerar l'efecte dels edificis circumdants.

3.1.1 Eines de generació existents

Durant la darrera dècada, i fins a dia d'avui, han aparegut nombroses eines per a la implementació d'UBEM amb l'objectiu de proporcionar informació sobre la demanda energètica actual i futura dels edificis. Algunes eines també permeten realitzar altres anàlisis més específics com l'avaluació d'escenaris futurs, anàlisis espacio-temporals per detectar pics de consum o per a la identificació de patrons energètics, i fins tot algunes permeten la integració de sistemes energètics urbans com les xarxes de calor i fred. Ferrando, Causone, Hong, & Chen (2020) presenten una revisió detallada de les principals eines desenvolupades per la generació d'UBEM de tipus *bottom-up* basats en la física. La Figura 3.1 presenta la cronologia del desenvolupament de les eines de generació més utilitzades actualment.

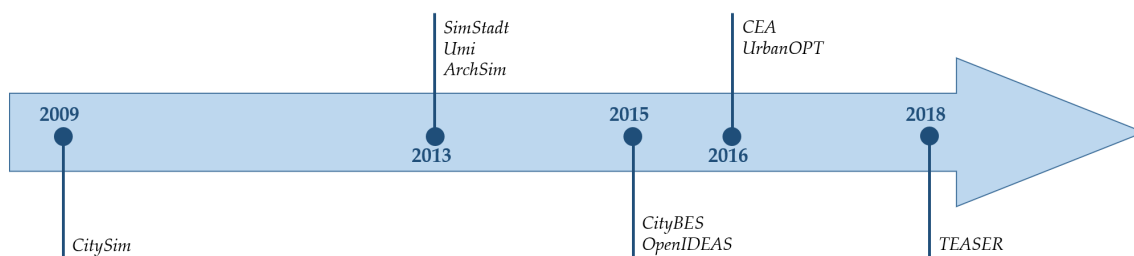


Figura 3.1. Cronologia del desenvolupament de les eines de generació més utilitzades

Font. Elaboració pròpia basada en Ferrando, Causone, Hong, & Chen (2020)

Desenvolupada l'any 2009 a partir de l'eina de modelització *Sustainable Urban Neighbourhood* (SUNtool) (Robinson et al., 2007) i amb l'objectiu de recolzar la planificació sostenible de les zones urbans, CitySim^{3.1} va ser una de les primeres eines concebudes per la generació d'UBEM (Robinson et al., 2009). Dissenyada amb els llenguatges de programació Java^{3.2} i C++^{3.3}, el model energètic de CitySim s'ha desenvolupat per analogia a un circuit elèctric, i permet disposar de subespais vinculats en els edificis mitjançant la conductància de les parets de separació.

Més tard, l'any 2013, es va desenvolupar l'eina SimStadt^{3.4} que consisteix en una plataforma de simulació energètica per recolzar la planificació de la transició energètica a escala urbana (Nouvel et al., 2015). Aquesta permet la creació ràpida d'escenaris d'avaluació mitjançant l'ús de ratis de rehabilitació anuals, així com indicadors de prioritat i de perspectiva temporal. També desenvolupada en el llenguatge de programació Java, aquesta permet integrar dades en format CityGML, així com de la seva extensió *Energy Application Domain Extension* (Energy ADE) (Agugiaro et al., 2018) que conté informació relacionada amb les diferents propietats dels edificis.

També l'any 2013, es va desenvolupar l'ArchSim Energy Modeling (Dogan, 2013). Aquest és un *plugin* específic per a la modelització energètica d'edificis dels softwares de CAD (*Computer-Aided Design*) i disseny paramètric Rhinoceros^{3.5} i Grasshopper^{3.6}. Permet la

^{3.1} <https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/>

^{3.2} Més informació a <https://www.oracle.com/es/java/>

^{3.3} Més informació a https://www2.eii.uva.es/fund_inf/cpp/temas/1_introduccion.html

^{3.4} <https://simstadt.hft-stuttgart.de/de/index.jsp>

^{3.5} Més informació a: <https://www.rhino3d.com/>

^{3.6} Més informació a: <https://www.grasshopper3d.com/>

creació de models energètics multi-zonals complexos amb la particularitat que les dades geomètriques del model, així com les propietats arquitectòniques i els horaris d'utilització són totalment paramètrics. Val a dir que l'última versió d'ArchSim ha canviat recentment de nom anomenant-se en l'actualitat *ClimateStudio*^{3.7}.

Durant el mateix any i amb l'objectiu d'avaluar el consum d'energia dels edificis, tant a escala de barri com de ciutat, així com les opcions de transport sostenible, la il·luminació natural i la producció d'aliments (Reinhart et al., 2013), entre altres, es va desenvolupar l'*Urban Modelling Interface*^{3.8} (umi). Igual que l'eina ArchSim, umi també és un *plugin* dels softwares Rhinoceros i Grasshopper, que integra altres eines com l'*Urban Weather Generator* (UWG) permetent calcular els efectes meteorològics urbans (Bueno et al., 2015), així com DaySim^{3.9} per estimar la disponibilitat de llum diürna.

Durant els anys 2015 i 2016 es va produir un important desenvolupament d'eines de generació d'UBEM (Ferrando et al., 2020). D'una banda, el 2015 es va desenvolupar el *City Building Energy Saver*^{3.10} (CityBES), una plataforma web amb la capacitat de simular el rendiment energètic d'edificis a gran escala (Hong et al., 2016). Entre les seves múltiples utilitats destaca la possibilitat de realitzar anàlisis energètics comparatius, anàlisis per avaluar les millors estratègies d'optimització dels sistemes energètics, i l'anàlisi del potencial solar fotovoltaic. A més, CityBES permet la interacció de CityGML amb la caracterització dels edificis així com l'eina de simulació per visualitzar el rendiment energètic dels edificis, obtenint els resultats de manera visual en una volumetria 3D.

També l'any 2015 es va desenvolupar l'*Open Integrated District Energy Assessment by Simulation*^{3.11} (OpenIDEAS). Concebuda en el llenguatge de codi obert Modelica^{3.12}, aquesta eina permet avaluar els perfils de càrrega dels edificis a través de simular els edificis integrats en una xarxa energètica a escala de barri en un únic model (Baetens et al., 2015).

D'altra banda, durant l'any 2016 es va llançar l'eina *City Energy Analyst*^{3.13} (CEA) basada en el llenguatge de programació Python^{3.14}. Aquesta consisteix en una plataforma per realitzar simulacions d'edificis a escala urbana que permet analitzar els efectes, les

^{3.7} <https://www.solemma.com/climatestudio>

^{3.8} <http://web.mit.edu/sustainabledesignlab/projects/umi/index.html>

^{3.9} Més informació a <https://daysim.software.informer.com/4.0/>

^{3.10} <https://citybes.lbl.gov/>

^{3.11} <https://github.com/open-ideas>

^{3.12} Més informació a <https://modelica.org/>

^{3.13} <https://www.cityenergyanalyst.com/>

^{3.14} Més informació a <https://www.python.org/>

compensacions, i les sinergies entre el disseny urbà i els plans d'infraestructures energètiques (Fonseca et al., 2016).

També l'any 2016 es va desenvolupar l'*Urban Renewable Building and Neighborhood Optimization*^{3.15} (URBANopt) amb l'objectiu de simular el rendiment energètic dels edificis a escala urbana, així com xarxes urbanes tant de calor com de fred. Aquesta utilitza la plataforma OpenStudio^{3.16} per realitzar els models energètics detallats, així com EnergyPlus per al càlcul de la demanda energètica (Polly et al., 2016).

Finalment, l'any 2018 es va llançar l'eina *Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit*^{3.17} (TEASER), basada en el llenguatge de programació Python. Desenvolupada per l'avaluació del potencial de mesures d'eficiència energètica dels edificis, TEASER permet combinar múltiples conjunts de dades per caracteritzar els edificis, així com la realització de simulacions dinàmiques per avaluar el consum energètic del parc edificat. El seu principal objectiu és la integració dels UBEM amb els models urbans de sistemes energètics (USEM de l'anglès *Urban System Energy Model*) permetent representar en detall l'entorn construït d'una ciutat així com una caracterització detallada dels sistemes energètics urbans incloent la distribució (Remmen et al., 2018).

3.1.2 Flux de treball de les eines de generació

Tot i haver estat desenvolupades amb diferents propòsits i presentar diferències entre elles, totes les eines de generació tenen un flux de treball molt similar dividit en cinc etapes: (1) dades d'entrada, (2) generació del model, (3) simulació, (4) resultats o producte i finalment (5) post-procés. La Figura 3.2 presenta de manera esquemàtica les diferents etapes del flux de treball de les eines de generació, i destaca en vermell les tractades en el present capítol.

^{3.15} <https://www.nrel.gov/buildings/urbanopt.html>

^{3.16} Més informació a <https://openstudio.net/>

^{3.17} <https://github.com/RWTH-EBC/TEASER>

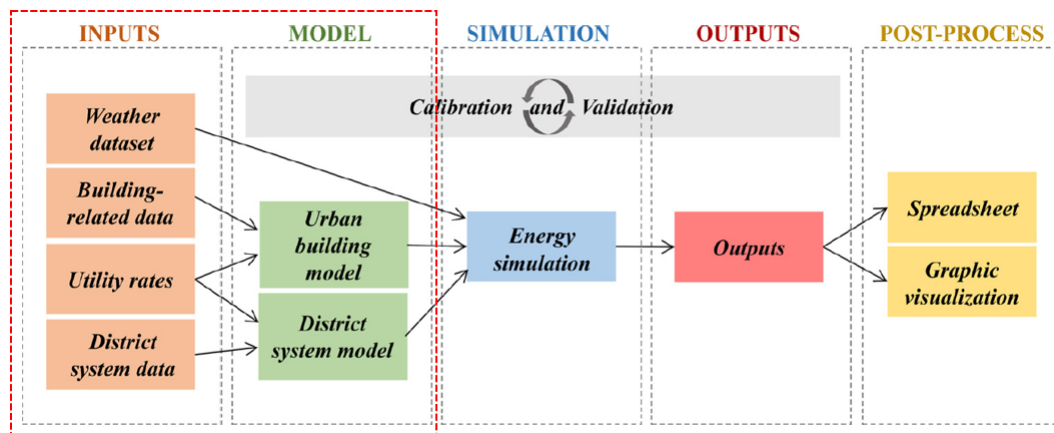


Figura 3.2. Flux de treball de les eines de generació d'UBEM (en vermell les etapes objecte del present capítol)

Font. Ferrando, Causone, Hong, & Chen (2020)

3.1.2.1 Format de les dades d'entrada

Tal com s'ha exposat en el Capítol 2, al marge de l'eina utilitzada, les dades d'entrada d'un UBEM es divideixen en tres categories: (1) la informació climàtica, (2) la geometria dels edificis i del seu entorn i (3) les propietats no-geomètriques dels edificis, tot i que en algunes eines també es poden incorporar altres dades com les mesures d'estalvi energètic o els objectius en matèria d'eficiència energètica a acomplir (Ferrando et al., 2020). El format de les dades d'entrada és una de les principals diferències entre les eines de generació existents, així com les propietats no-geomètriques requerides per definir els edificis. La Taula 3.1 presenta els formats admesos per cadascuna de les eines enunciades en la secció 3.1.1, així com altres particularitats de les dades d'entrada.

Pel que fa als formats compatibles, a diferència de la informació climàtica on en totes les eines s'utilitzen els fitxers *.epw*, els formats de les dades relacionades amb la geometria dels edificis i l'entorn poden ser molt diferents, i inclús una mateixa eina pot admetre més d'un format. El tipus d'arxius més freqüents, dels quals pràcticament totes les eines admeten com a mínim un dels formats, són els de tipus SIG que inclou CityGML, GeoJSON, Shapefile o OpenStreetMap. A més, aquests són els formats més utilitzats i més estàndard per emmagatzemar la informació relacionada amb els edificis per part dels organismes públics (Ferrando et al., 2020). Altres formats menys freqüents són el format *.idf*, de l'anglès *intermediate data format*, així com llenguatges de programació com python o modelica.

Pel que fa a les propietats no-geomètriques necessàries per definir els edificis també poden variar en funció de l'eina utilitzada per la generació de l'UBEM, no obstant hi ha tres propietats que són comunes independentment de l'eina utilitzada: (1) la informació

relacionada amb l'embolcall dels edificis, és a dir les propietats arquitectòniques, (2) els sistemes, que inclouen la il·luminació, els aparells elèctrics i els sistemes de climatització, i (3) la utilització d'aquests per part dels usuaris. La definició d'aquestes darreres són a dia d'avui una de les propietats no-geomètriques que generen més controvèrsia. El comportament dels ocupants és un dels principals factors que influeixen en el consum energètic dels edificis, no obstant en el camp dels UBEM la definició d'aquest encara no està adequadament implementada. Com s'aprecia en la Taula 3.1 totes les eines de generació, excepte una, tant sols permeten la definició de les dades relacionades amb la conducta dels usuaris de manera determinista, tot i que segons Marschall et al. (2019) són els models estocàstics els que permeten captar de manera més idònia la naturalesa dinàmica i probabilística de les accions dels essers humans. Una clara evidència de la importància de la definició del comportament dels usuaris és que la majoria d'eines tenen aquesta funció en desenvolupament i s'espera que les seves properes versions permetin la definició del comportament dels usuaris de manera estocàstica.

A més de les propietats relacionades amb l'embolcall, els sistemes i el comportament dels usuaris, algunes eines també permeten definir altres propietats en el model com el tipus de font d'energia utilitzada, les mesures d'estalvi energètic a incorporar o objectius a assolir en matèria d'eficiència energètica. Val a dir, que en cas de no disposar d'informació sobre les propietats no-geomètriques, pràcticament totes les eines disposen de llibreries amb diferents tipus de propietats tot i que s'ha de tenir present que aquestes poden no ser representatives de la zona d'estudi en qüestió. Per exemple, umi disposa de plantilles per definir els edificis en funció del seu ús (p. ex. residencial, oficines, etc.). En el cas d'ArchSim els horaris d'utilització inclosos en la llibreria poden arribar inclús a definir estances (p. ex. cuina, habitació, etc.) tot i que en el camp dels UBEM, fins ara, no es modelitza a aquest nivell de detall.

Dades d'entrada		CitySim	SimStadt	umi	CityBES	OpenIDEA	CEA	URBANopt	TEASER	ArchSim	
Formats compatibles	Sistemes d'informació Geogràfica		X	S			X			X	
	CityGML	X	X		X		X		X		
	GeoJSON				X			X		X	
	Open Street Maps (.osm)							X		X	
	Intermediate Data Format (.idf)				X	X		X		X	
	Modelica (.mo)						X		X		
	Python (.py)						X		X		
Caracterització dels edificis	Dades requerides	Embolcall	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Sistemes	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Descripció dels ocupants	Determinista	X	X	X	X		X	X	X	X
		Estocàstica	S		S	S	X (res)	P		P	
	Dades d'ús d'energia										
	Integració de dades <i>EnergyIDAE</i>			X		S		X			
	Característiques incloses per defecte				X	X	X	X	X	X	X
	Arq. basats en	Ús	X		X	X	X	X	X	X	
		Any de construcció				X		X		X	
		Volums								X	
Tipologies		X			X		X	X	X		
Altres	Mesures d'estalvi energètic				X						
	Objectius d'eficiència		X		X						

X = funció o característica disponible en l'actualitat; P = funció o característica parcialment; S = funció o característica en desenvolupament

Taula 3.1. Resum de les dades d'entrada requerides per les principals eines de generació existents

Font. Elaboració pròpia amb dades de Ferrando et al. (2020)

Val a dir que, tot i que la Taula 3.1 presenta les principals característiques de les dades d'entrada, la majoria d'aquestes eines de generació estan en continu desenvolupament i es preveu que les properes versions comptin amb millores significatives.

3.1.2.2 Generació del model energètic

La generació del model és la combinació de les dades geomètriques amb les seves respectives propietats termo-físiques i d'ús, així com de la informació climàtica. Aquest procés es realitza de manera manual per cadascuna de les zones tèrmiques que componen el model tot i que algunes eines proposen opcions per fer-ho de manera més automatitzada. Com s'ha explicat anteriorment, les propietats no-geomètriques definides en un UBEM van generalment associades a un grup d'edificis específics en base als resultats obtinguts de la fragmentació parc. Per això, diverses eines proposen mètodes d'agrupació dels edificis en base a certs criteris, simplificant així l'associació de propietats amb els edificis corresponents. Generalment aquests criteris corresponen a: (1) l'ús de l'edifici, (2) l'any de

construcció, (3) volums i (4) tipologies. Tot i facilitar l'assignació de les propietats, aquesta funció no està desenvolupada per la totalitat d'eines. Val a dir que en el cas d'algunes eines de generació com umi o ArchSim, a l'estar incloses dins de l'entorn de Rhinoceros, els edificis es poden organitzar prèviament en un sistema de capes per facilitar aquesta etapa d'associació.

Una alternativa molt útil que simplifica significativament la generació dels UBEM és l'ús de dades *EnergyIDAE*, extensió dels arxius CityGML que inclou les propietats termofísiques dels edificis (Ferrando et al., 2020). Tanmateix, val a dir que aquesta funcionalitat només està disponible en poques eines degut a que aquestes dades no acostumen a estar disponibles.

3.1.3 Tipus de models tèrmics

Independentment de l'eina de generació, cal tenir en compte el tipus de model tèrmic a definir, així com el detall d'aquest. En el cas més senzill, el comportament tèrmic dels edificis es modela mitjançant models estacionaris uni-zonals d'un únic edifici per arquetip. Una vegada realitzada la simulació, els resultats d'aquesta s'escalen a la resta d'edificis que componen el parc edificat ja sigui multiplicant-los pel nombre d'edificis (Firth & Lomas, 2009), o realitzant una ponderació per la superfície (Dall'ó et al., 2012). Aquest tipus d'aproximació omet que el context urbà dels edificis pot afectar significativament al rendiment d'aquests per exemple a través de la projecció d'obres o per patrons de vent localitzats. A més, tot i aconseguir reduir el temps de càlcul considerablement, basar-se en models estacionaris uni-zonals d'un sol edifici per arquetip, redueix la precisió dels resultats (Johari et al., 2020). D'una banda, els models uni-zonals no tenen la capacitat de plasmar l'efecte del context urbà o el microclima en el càlcul del rendiment dels edificis, i tampoc aconsegueixen representar els edificis d'ús mixt. D'altra banda, els models estacionaris no permeten determinar la variabilitat en funció del moment del dia o de l'època de l'any. En conseqüència, segons l'aplicació pot ser preferible utilitzar models multi-zonals dinàmics.

A la pràctica, un model multi-zonal dinàmic és un model que es compon d'una xarxa de zones tèrmiques simulat per un transcurs de temps específic, generalment un any, a una resolució temporal donada. Una zona tèrmica és la unitat base utilitzada en la modelització d'edificis. Consisteix en un espai o conjunt d'espais que tenen requisits similars de condicionament com l'ocupació, la temperatura de consigna de la calefacció i/o la refrigeració, els aparells elèctrics, etc. Tot i l'existència de diverses alternatives pel que fa a la zonificació dels edificis, tal com detalla Smith (2012), en el context dels UBEM l'atenció es centra en dues possibilitats. D'una banda, la generació d'una zona tèrmica per planta com

en el cas de l'UBEM de Boston elaborat per Cerezo Davila, Reinhart, & Bemis (2016), i d'altra banda, com suggerit per les directrius de l'ASHRAE^{3.18}, la generació de cinc zones per planta (una zona nucli, i quatre zones perimetrals) com al model realitzat per Chen & Hong (2018). La Figura 3.3 il·lustra les tres principals configuracions de zones tèrmiques utilitzades en els UBEM.

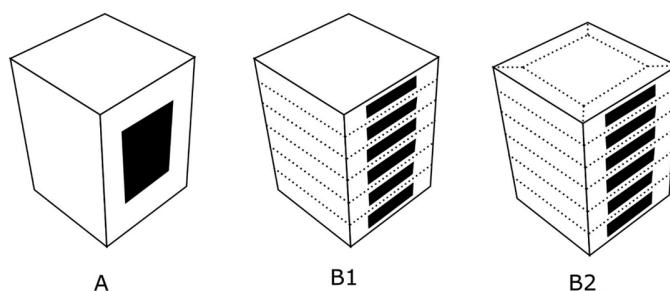


Figura 3.3. Configuracions de zones tèrmiques en UBEM (A: model uni-zonal, B1: model multi-zonal amb una zona per planta i B2 model multi-zonal amb cinc zones per planta)

Font. Johari et al. (2020)

Encara que en l'actualitat la creació de models multi-zonals és factible, aquesta representació tant detallada dels edificis requereix buscar un compromís entre la complexitat del model i la precisió dels resultats. En aquest sentit, i amb la intenció de simplificar el model sense perjudicar els resultats, Chen & Hong (2018) proposen una alternativa que consisteix en modelar explícitament les plantes extremes dels edificis, la primera i l'última planta, mentre que les plantes intermèdies es modelen com una única planta. Els resultats de la simulació s'escalen a posteriori en funció del número de plantes. La separació de l'edifici en tres seccions utilitzant ponderacions per planta permet accelerar el procés de simulació preservant la precisió dels resultats (Johari et al., 2020). No obstant, aquesta aproximació només és vàlida en els casos en que les plantes intermèdies tenen les mateixes característiques.

En general, com més petit sigui el nombre de zones tèrmiques que es defineixen, més petit serà l'esforç per definir les propietats de cadascuna d'elles. No obstant, si se'n defineixen massa poques és probable que els resultats de la simulació tinguin menor precisió.

A banda de la zonificació, un altre aspecte a considerar pel que fa al model tèrmic és la manera d'obtenir la demanda a escala de ciutat, modelant un sol edifici per arquetip i extrapolant els resultats a la resta d'edificis, o modelant tots i cadascun dels edificis.

^{3.18} Més informació a <https://www.ashrae.org/>

3.2 Generació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany

3.2.1 L'eina de generació

Com s'ha avançat prèviament en el Capítol 2, la generació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ha realitzat amb l'eina *ArchSim Energy Modeling* (Dogan, 2013). La principal raó per la qual s'ha escollit ArchSim és perquè, a diferència de la resta d'eines presentades en la secció 3.1.1, permet tant assignar les propietats no-geomètriques com obtenir els resultats de l'UBEM a escala de zona tèrmica. Les altres eines, tot i realitzar les simulacions a escala de planta, tant sols permeten obtenir els resultats d'aquestes a escala d'edifici. Aquesta resolució a escala d'edifici, habitual en el camp dels UBEM, no permet implementar, i per tant avaluar l'impacte, de la nova metodologia de fragmentació desenvolupada en la present tesi realitzada a escala d'unitat cadastral.

Tal com s'ha presentat en la secció 3.1.1, ArchSim és un *plugin* específic per a la modelització energètica d'edificis dels softwares Rhinoceros i Grasshopper. El primer és un modelador de superfícies de forma lliure que utilitza el model matemàtic NURBS, de l'anglès *non-uniform rational B-spline*, que són representacions matemàtiques capaces de reproduir qualsevol forma 3D amb precisió. La seva arquitectura d'aplicació oberta el fan modular i permet als usuaris crear ordres i menús personalitzats. A més, Rhinoceros ofereix compatibilitat amb altres programes, admetent més de 30 formats d'arxius CAD tant pel que fa a la importació com a l'exportació, la qual cosa el converteix en una excel·lent plataforma per a l'intercanvi de dades.

D'altra banda, Grasshopper és un entorn i llenguatge de programació visual lliure que s'executa dins de Rhinoceros. Els programes són creats arrossegant diferents components amb funcions específiques en un *canvas* connectant els *outputs* dels uns als *inputs* dels components posteriors. A més dels components amb funcions bàsiques inclosos per defecte, un dels principals avantatges de Grasshopper és que disposa d'una gran varietat de *plugins* amb funcions específiques en diversos camps d'estudi com la joieria, el sector sanitari, el naval, l'arquitectura, així com la modelització energètica, entre molts altres. La gran majoria d'aquests són gratuïts i es poden descarregar de plataformes en línia com Food4Rhino^{3.19}. A més, Grasshopper també inclou la possibilitat de crear components personalitzats amb scripts propis en diferents llenguatges de programació com Python, C o Visual Basic. La Figura 3.4 presenta una vista general de les interfícies de Rhinoceros i Grasshopper, del

^{3.19} Mes informació a: <https://www.food4rhino.com/en>

plugin de Grasshopper ArchSim, així com un exemple d'*script* realitzat amb el llenguatge de programació visual de Grasshopper.

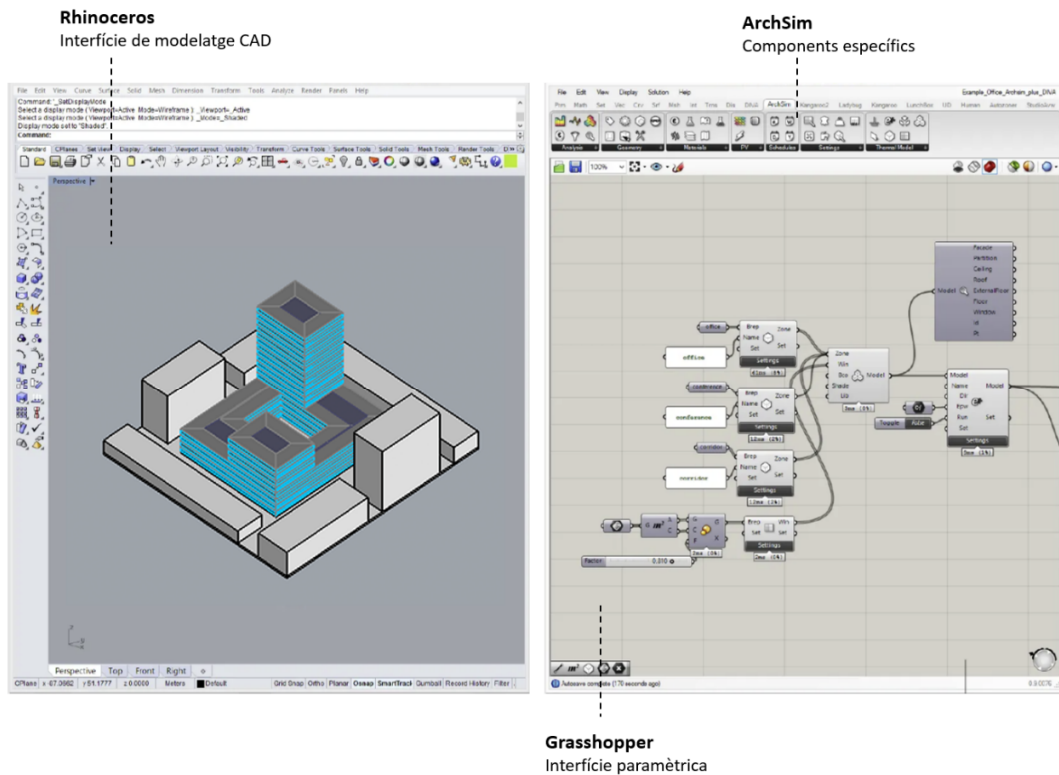


Figura 3.4 Interfícies dels softwares Rhinoceros i Grasshopper, així com dels components del *plugin* ArchSim

Font. Elaboració pròpia

ArchSim és un *plugin* específic concebut per a la simulació energètica d'edificis comercialitzat per l'empresa Solemma^{3.20} que permet realitzar simulacions energètiques enllaçant el motor de càlcul EnergyPlus amb un potent entorn de disseny paramètric i modelatge CAD. També pot ser utilitzat per a la realització d'exploracions ràpides de disseny inicial, on la forma de l'edifici, els WWR, els sistemes constructius i envidrament, així com els sistemes passius d'ombra i el potencial de ventilació natural es posen a prova pel seu impacte en el rendiment i el confort ambiental de l'edifici. A més, molts dels *inputs* de simulació com ara la geometria, els materials de construcció i els perfils d'ús de les zones són paramètrics i poden ser combinats amb algoritmes d'optimització mitjançant altres *plugins* específics dins de Grasshopper. La Figura 3.5 presenta de manera esquemàtica el

^{3.20} <https://www.solemma.com/>

flux d'informació bàsic per la generació de models energètics amb l'eina ArchSim en l'entorn Rhinoceros i Grasshopper.

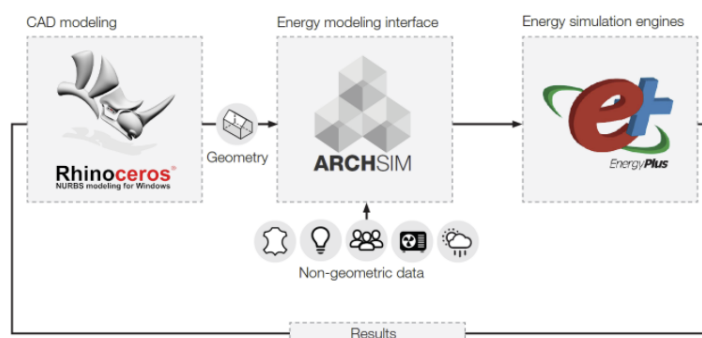


Figura 3.5. Flux d'informació bàsic de l'eina de generació ArchSim en l'entorn Rhinoceros i Grasshopper

Font. Dogan (2013)

3.2.2 Generació de la volumetria dels edificis i de l'entorn

3.2.2.1 Generació de la volumetria dels edificis

Tal com s'exposa en la fase de caracterització (Capítol 2 secció 2.2.3.1), la volumetria base sobre la qual s'ha generat l'UBEM d'Escaldes-Engordany consisteix en una extrusió de tipus LoD1 de les dades vectorials del cadastre prèviament simplificades. Tot i que *Rhinoceros* és un potent software de modelatge CAD, la totalitat del procés d'extrusió s'ha realitzat de manera paramètrica mitjançant Grasshopper amb l'objectiu d'automatitzar al màxim les etapes de la generació i evitar modelar els edificis individualment.

Per importar les dades vectorials en Rhinoceros així com la seva taula d'atributs en Grasshopper s'ha utilitzat el *plugin* @it^{3.21}, especialitzat en la visualització i l'anàlisi de dades geo-espacials. Prèviament, s'han afegit en la seva taula d'atributs totes les dades necessàries per generar la volumetria dels edificis. A la taula d'atributs base del cadastre, la qual tant sols inclou els identificadors cadastrals de cadascun dels edificis, s'hi han afegit els següents camps: (1) període constructiu, inclosos els subperíodes B1 i B2, (2) número de plantes, (3) alçada base i (4) alçada màxima, obtingudes a partir de les dades LiDAR. Val a dir que, tot i que la present tesi doctoral es centra en els edificis residencials, la volumetria generada per l'UBEM d'Escaldes-Engordany inclou la totalitat del parc edificat per poder tenir en compte les projeccions d'ombra.

^{3.21} Més informació a: <https://www.food4rhino.com/en/app/it>

Posteriorment a la importació, s'han desplaçat els polígons en l'eix z en base a les seves corresponents alçades màximes anteriorment afegides en la taula d'atributs, i s'ha realitzat l'extrusió. L'alçada s'ha determinat individualment per cadascun dels edificis multiplicant el número de plantes d'aquests, informació prèviament inclosa en la taula d'atributs, per una alçada lliure tipus de 2,5 metres establerta en la fase de caracterització (Capítol 2 secció 2.2.3.1). Val a dir que, a l'haver desplaçat els polígons en la seva cota màxima, les extrusions s'han realitzat en negatiu. Aquest procés s'ha realitzat d'aquesta manera ja que molts edificis del parc d'Escaldes-Engordany consten de plantes sota rasant o semisoterrades.

La Figura 3.6 mostra la visualització en Rhinoceros en vista frontal de la volumetria dels edificis de l'UBEM d'Escaldes-Engordany generada en Grasshopper. En aquesta s'aprecien els polígons importats situats en la part inferior amb la mateixa cota en l'eix z, els polígons desplaçats (en verd) segons la seva cota màxima seguint el relleu del terreny, així com les volumetries situades sota aquests (en vermell).

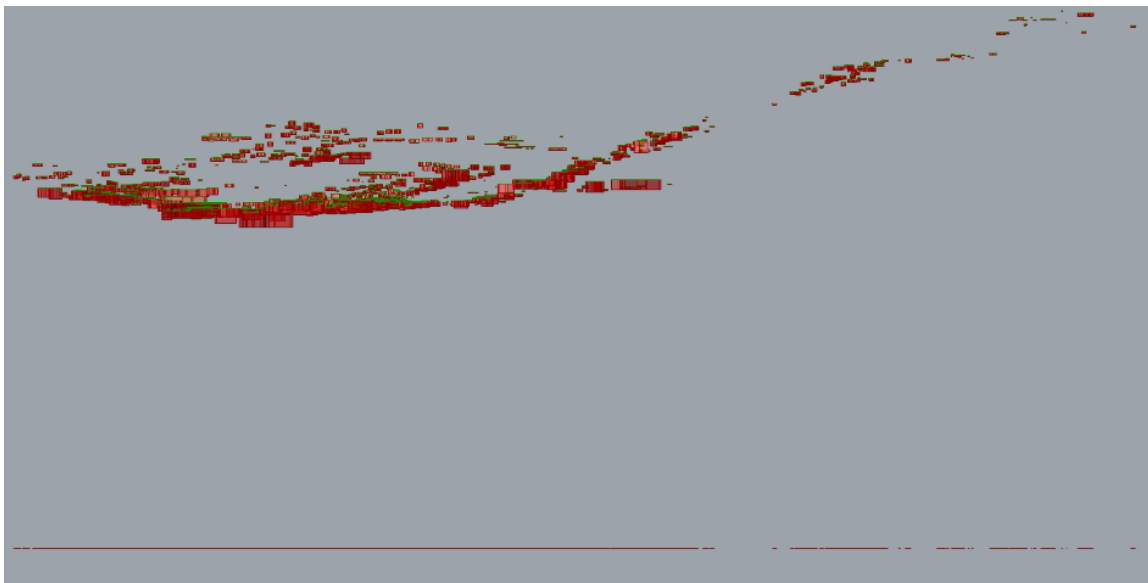


Figura 3.6. Procés de generació de la volumetria del parc edificat d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

En aquesta etapa hagués estat de gran ajuda disposar de la cota mínima i màxima per cadascun dels edificis per tal de que la volumetria del model s'ajustés de forma més precisa a la realitat. Val a dir que aquesta informació rara vegada està inclosa en els cadastres.

3.2.2.2 Definició de les zones tèrmiques

Un cop generada la volumetria dels edificis s'han definit les zones tèrmiques que formen l'UBEM d'Escaldes-Engordany. Tenint en compte les dades geomètriques disponibles, la zonificació s'ha definit a escala de planta. Val a dir que, l'haver realitzat la fragmentació del parc edificat a escala d'unitat cadastral (Capítol 2 secció 2.2.4.1) hagués estat més adient establir una zona tèrmica per cadascuna d'aquestes però, malauradament, la informació vectorial del cadastre no permet fer una divisió dels edificis més enllà de l'escala de planta. Per definir les plantes, els edificis s'han dividit mitjançant el component *Floor Cutter* d'ArchSim, especificant l'alçada lliure de les plantes, establerta en 2,5 metres en el procés d'extrusió.

La Figura 3.7 mostra la visualització en Rhinoceros de les zones tèrmiques corresponents a les plantes dels edificis. En aquesta s'aprecia com els edificis ja no estan representats per un únic volum, sinó per un volum per planta. En total, el parc edificat d'Escaldes-Engordany es compon de 5 730 zones tèrmiques repartides en 1 271 edificis amb una mitja de 4,7 zones tèrmiques per edifici, sent 1 el número mínim de zones tèrmiques presents en un edifici i 21 el màxim.

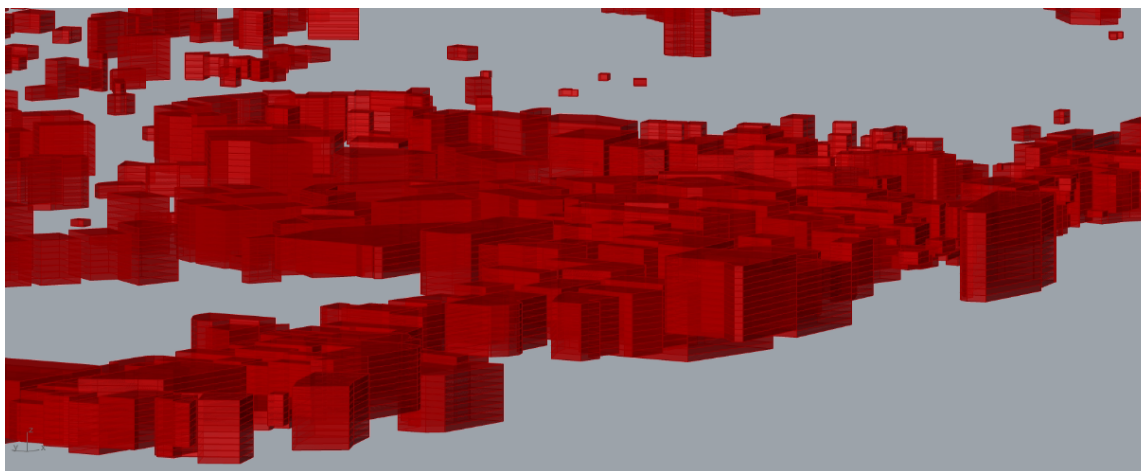


Figura 3.7. Creació de les zones tèrmiques de l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

Paral·lelament a la generació de les zones tèrmiques, i per tal de facilitar la manipulació d'aquestes així com el posterior anàlisi dels resultats de les simulacions, s'ha assignat un identificador a cadascuna de les zones tèrmiques. Els softwares Rhinoceros i Grasshopper assignen per defecte un GUID, de l'anglès *Globally Unique Identifier*, a tots els elements generats que consisteix en una seqüència de números aleatòria única. Els GUID assignats

automàticament per Rhinoceros no tenen cap relació amb els identificadors dels edificis utilitzats al llarg de la tesi. Per aquest motiu, s’ha generat un *script* per assignar un identificador a cada zona. Aquest està format per l’identificador cadastral de l’edifici seguit de la planta a la qual pertany la zona tèrmica (p. ex. 700-001_0), permetent reconèixer ràpidament a quin edifici i planta pertanyen cadascuna de les zones tèrmiques del model.

3.2.2.3 Generació de les finestres

Treballar amb una volumetria LoD1 obliga a generar les finestres separatament sobre la volumetria. Per generar-les s’ha creat un *script* específic, ja que ArchSim no disposa de components que realitzen aquesta funció i tampoc s’ha trobat cap *plugin* per fer-ho. Aquest *script* permet la creació d’una única finestra per façana de dimensions segons el WWR desitjat. El procediment realitzat es detalla a continuació.

Primerament s’han intersecat totes les zones tèrmiques del model mitjançant el component *intersector* d’ArchSim. Aquest permet la identificació de les parets mitgeres dels edificis sobre les quals no generar finestres.

Seguidament, per cadascuna de les cares que componen les zones tèrmiques de l’UBEM, s’han extret les coordenades dels centroides i s’han determinat les seves respectives coordenades normals, que indiquen el moviment de la cara respecte el centre de la zona tèrmica mitjançant 1, 0 i -1, tal com mostra la Figura 3.8.

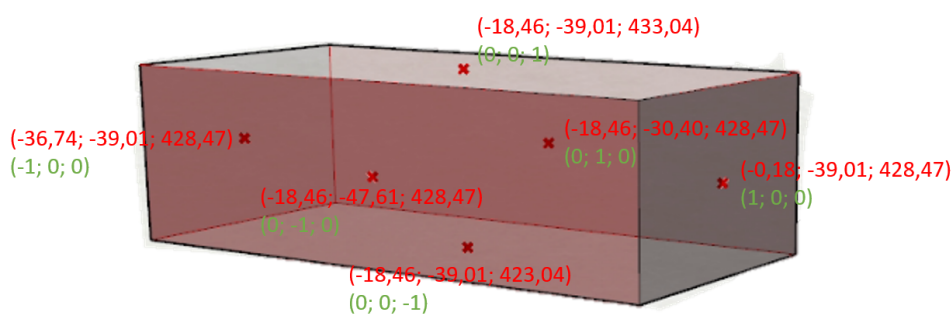


Figura 3.8. Coordenades (vermell) i coordenades normals (en verd) dels centroides de les cares d’una zona tèrmica

Font. Elaboració pròpia

Una vegada obtingudes les coordenades normals, s’han seleccionat únicament les cares amb valor 0 en l’eix z corresponents a les façanes. Finalment, sobre cadascuna de les cares representant les façanes de les zones tèrmiques s’ha escalat una superfície del 24% de la

façana en base al WWR establert en la caracterització (Capítol 2 secció 2.2.3.2). El resultat de l'escalat realitzat per crear les finestres sobre una zona tèrmica es mostra en la Figura 3.9.

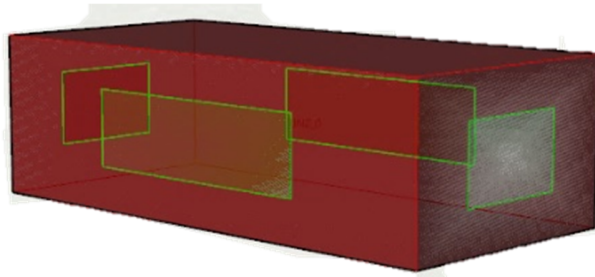


Figura 3.9. Resultat de creació de les finestres en una zona tèrmica en base al WWR definit

Font. Elaboració pròpia

Tal com es mostra en la Figura 3.10, aquest procediment s'ha realitzat per les zones tèrmiques residencials del model. En aquesta s'aprecia la volumetria dels edificis dividits en zones tèrmiques, així com les finestres generades en els edificis residencials.

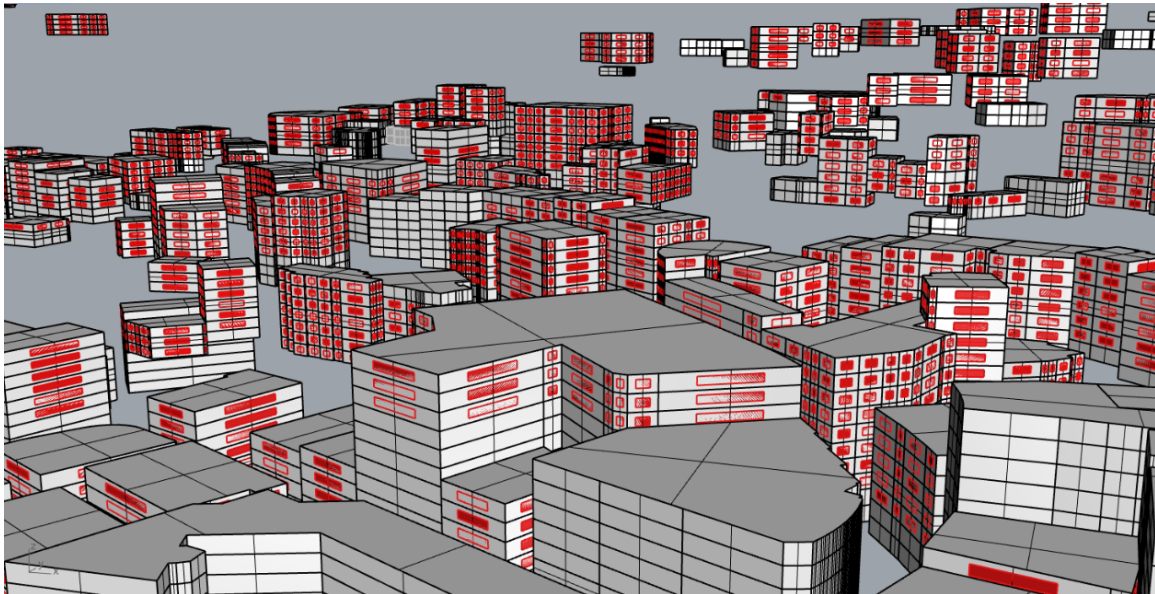


Figura 3.10. Visualització en Rhinoceros de les zones tèrmiques (en gris) i les finestres (en vermell)

Font. Elaboració pròpia

3.2.2.4 Topografia del terreny

Per generar el terreny s'ha importat el MDE generat en la fase de caracterització (Capítol 2 secció 2.2.3.3) mitjançant el *plugin* de Grasshopper Bison^{3.15}, el qual es centra en l'arquitectura paisatgística i compta amb eines per a la importació, la creació, l'anàlisi, l'edició i l'anotació de malles de terreny.

Una de les particularitats de Bison és que no importa les coordenades del MDE, sinó que el situa a l'origen del document (Bison, 2018). Per situar el MDE d'Escaldes-Engordany a la seva ubicació geogràfica coincidint d'aquesta manera amb la volumetria dels edificis, s'ha desplaçat el MDE manualment en Rhinoceros en base a les seves coordenades geogràfiques. La Figura 3.11 mostra l'script utilitzat per fer la importació així com la seva visualització en Rhinoceros.

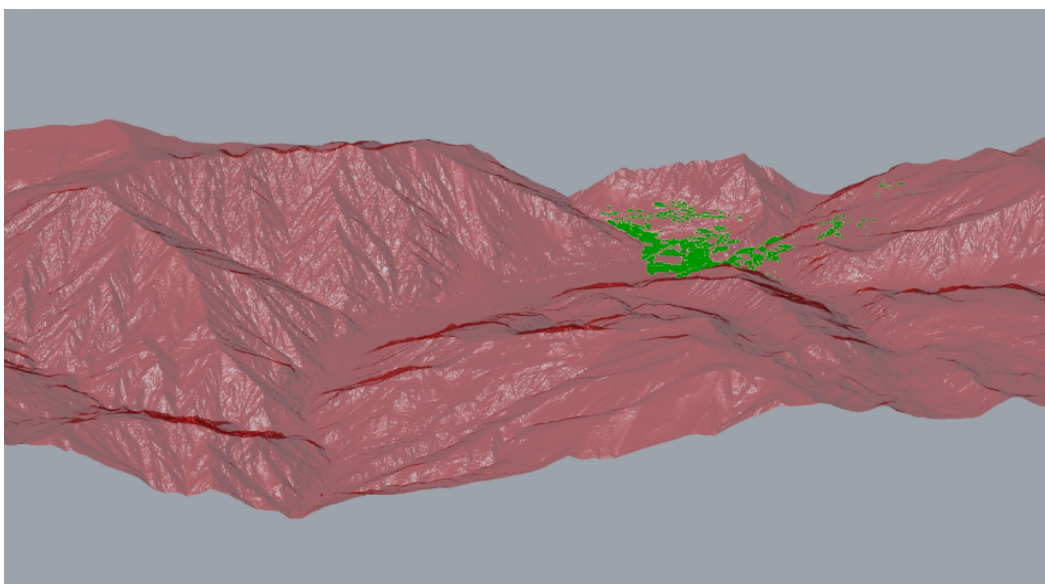


Figura 3.11. Importació i reubicació del MDE d'Escaldes-Engordany (en verd els edificis i en vermell el MDE)

Font: Elaboració pròpia

3.2.2.5 Exportació i organització de les dades a Rhinoceros

Un cop importats i generats tots els elements geomètrics que formen l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'han exportat a Rhinoceros, on s'organitzen en capes que permeten, posteriorment, una ràpida i àgil assignació de les respectives propietats no-geomètriques. La Figura 3.12 mostra l'organització dels elements geomètrics de l'UBEM d'Escaldes-

^{3.15} Més informació a: <https://www.bison.la/>

Engordany. Les zones tèrmiques s'han dividit en dos grups, les residencials i les no-residencials. A aquestes darreres tant sols se'ls assignen propietats no-geomètriques relacionades amb els aspectes arquitectònics i s'han estructurat en base als seus respectius períodes constructius. Pel que fa a les zones tèrmiques residencials, s'estructuren en base als arquetips resultants de la fase de fragmentació (Capítol 2 secció 2.3.3.1). En les finestres, com a elements arquitectònics, s'han definit les propietats segons el període constructiu de l'edifici al qual pertanyen.

En resum, els elements geomètrics del model es divideixen en 54 capes de les quals 42 pertanyen a zones tèrmiques residencials, 6 a zones tèrmiques no-residencials, 5 a les finestres i 1 al terreny.

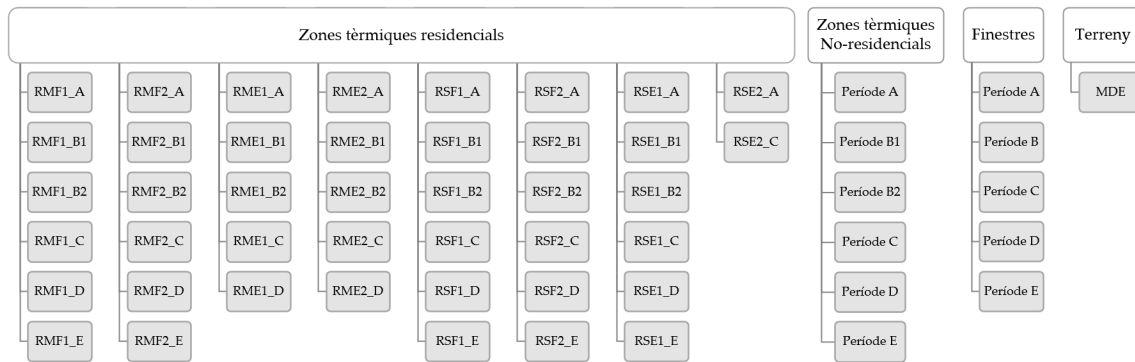


Figura 3.12. Organització de la dada d'entrada referent a la volumetria dels edificis i del seu entorn

Font. Elaboració pròpia

Una de les dificultats a l'hora d'estructurar les zones tèrmiques residencials és que la fragmentació realitzada en la fase de caracterització s'ha dut a terme a escala d'unitat cadastral, mentre que les zones tèrmiques del model s'han generat a escala de planta. Aquest salt d'escala comporta que diverses zones tèrmiques del model es composin d'unitats cadastrals pertanyents a arquetips diferents obligant a adaptar els resultats de la fragmentació a l'escala de planta. En els casos en els quals es disposa d'un arquetip predominant, s'ha establert aquest com l'arquetip de la zona tèrmica, mentre que per les zones tèrmiques sense un arquetip predominant s'han analitzat la resta de zones tèrmiques de l'edifici escollint la predominant.

3.2.3 Assignació de les propietats no-geomètriques

ArchSim disposa de diversos components específics per caracteritzar cadascun dels elements geomètrics que componen un UBEM. Ubicats en la categoria *Thermal Model* del menú d'ArchSim, cadascun d'ells permet assignar diverses propietats termo-físiques específiques als diferents elements geomètrics d'un UBEM. La Figura 3.13 mostra els components necessaris per a la generació de models energètics en ArchSim: (a) les zones tèrmiques, (b) les finestres, (c) les condicions especials de contorn, (d) els elements d'ombra, tots ells agrupats en el component *Zone Connectivity Network* a partir del qual s'obté el model energètic. A més, a part dels components de configuració dels elements geomètrics, també s'ha de connectar la llibreria en cas d'haver incorporat propietats no-geomètriques addicionals a les incloses durant la instal·lació d'ArchSim.

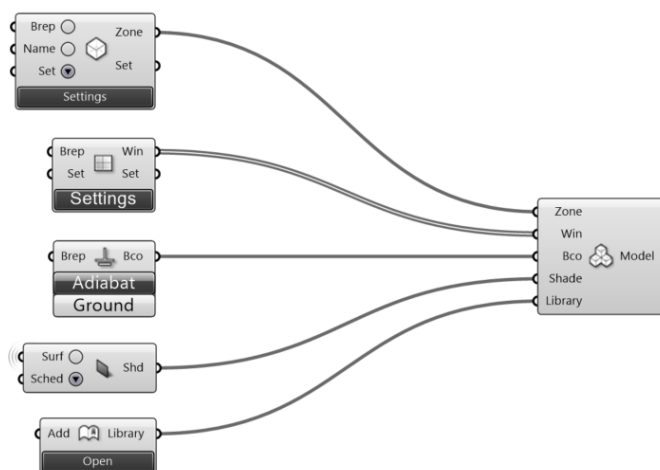


Figura 3.13. Estructura d'un model energètic en ArchSim

Font. Elaboració pròpia

Val a dir que la generació d'un UBEM no requereix de tots aquests elements obligatòriament, i inclús pot tenir més d'un component per element, en funció de les necessitats i especificitats de cada cas d'estudi.

3.2.3.1 Configuració de les zones tèrmiques

El punt de partida per la configuració de les propietats no-geomètriques és la configuració de les zones tèrmiques mitjançant el component *Thermal Zone* que permet assignar les propietats definides en la caracterització (capítol 2 secció 2.3.3).

En l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'han configurat 48 components (veure Figura 3.14), un per cadascun dels arquetips resultants de la fragmentació (Capítol 2 secció 2.3.3.1), als quals s'han associat les seves corresponents zones tèrmiques.

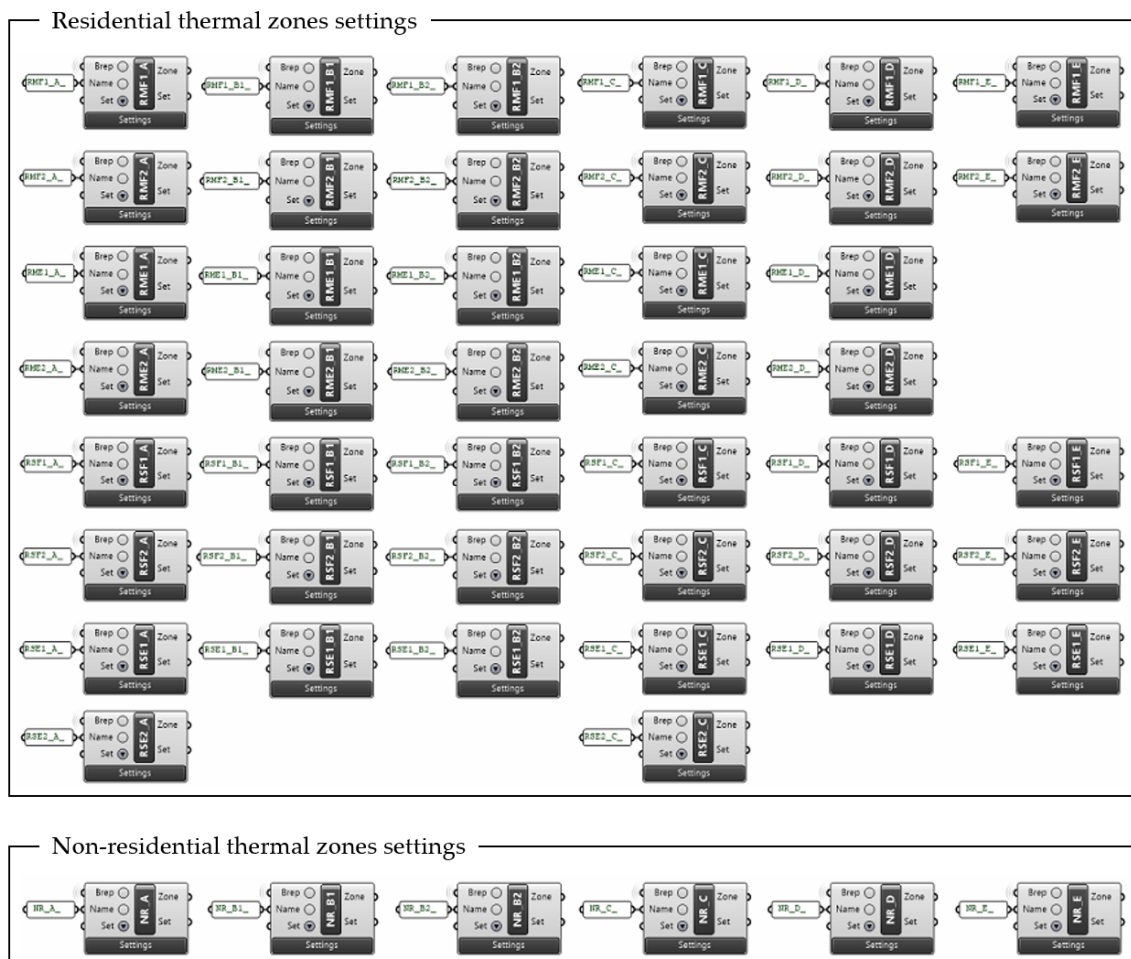


Figura 3.14. Components *Thermal Zones* configurats en l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

Una vegada associades les zones tèrmiques al seu corresponent component, es configuren els principals àmbits que formen una zona tèrmica (càrregues, climatització, ventilació, aigua calenta i construcció). La Figura 3.15 mostra les cinc pestanyes de la finestra de configuració del component *Thermal Zone*.

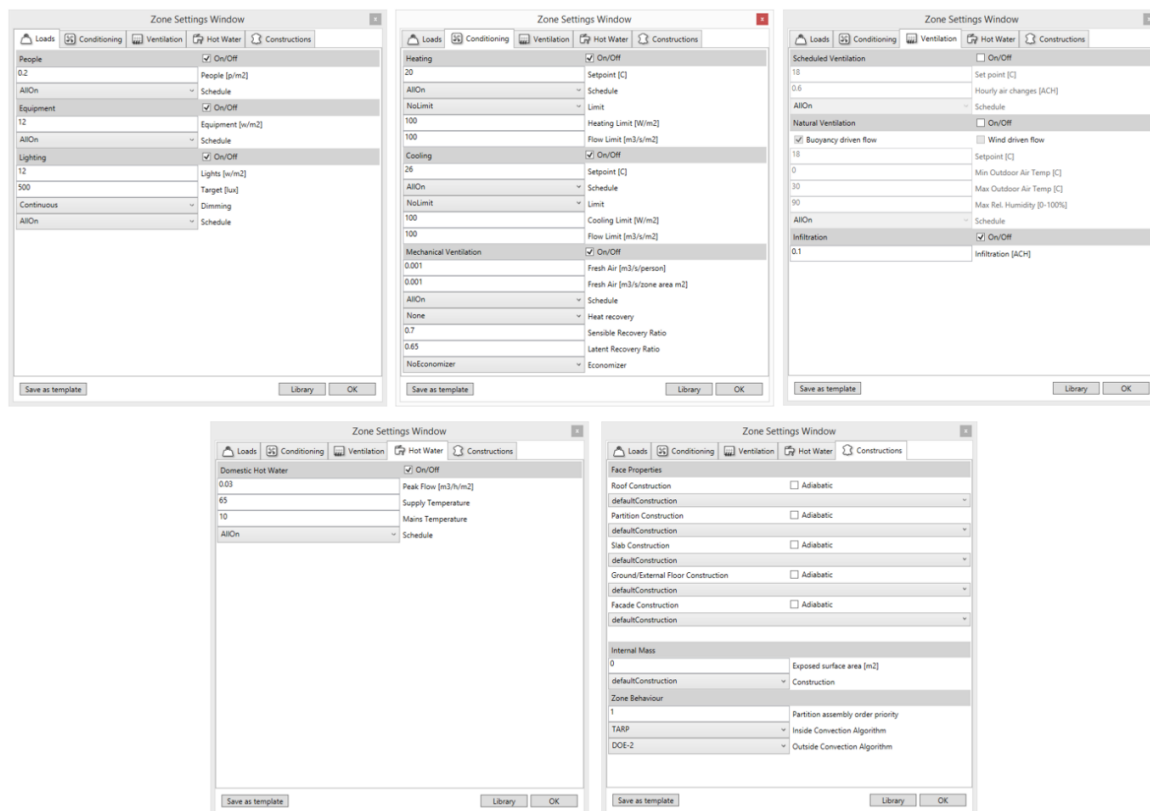


Figura 3.15. Àmbits de les zones tèrmiques considerats en l'ArchSim

Font: Elaboració pròpia

Els diferents sistemes i equips es poden activar o desactivar en funció de si la zona tèrmica en qüestió en disposa o no, i per cadascun d'ells es completen les dades requerides en base al definit en la fase de caracterització (Capítol 2 secció 2.3).

En la configuració s'usen dos tipus de dades. D'una banda les propietats no-paramètriques, especificades directament en la finestra de configuracions per cadascuna de les zones tèrmiques que corresponen principalment a les propietats dels sistemes de climatització, la il·luminació i aparells elèctrics presents en els edificis (p. ex. l'ocupació, la potència elèctrica destinada a aparells elèctrics i il·luminació, dades d'infiltracions, etc.). D'altra banda, les propietats paramètriques que estan vinculades a la llibreria d'ArchSim i s'utilitzen per caracteritzar els sistemes constructius dels diferents tancaments dels edificis, i els horaris d'ús dels sistemes i equips presents. A més, tot i disposar d'elements per defecte en la llibreria, ArchSim permet crear-ne de nous podent adaptar els models a les especificitats de cada cas d'estudi. La principal diferència respecte les dades no-paramètriques és que qualsevol modificació que es realitzi en les propietats paramètriques afecta a tots els

components *thermal zone* que l'utilitzin, mentre que les paramètriques s'han de modificar de manera individual per cada component

3.2.3.1.1 Materials de construcció i sistemes constructius

La composició dels tancaments dels edificis, tant exteriors com interiors, s'han definit de manera paramètrica mitjançant els components de la categoria *Materials* del menú d'ArchSim. Un tancament en l'ArchSim es compon de diferents materials de construcció amb un cert gruix i un determinat ordre que dona unes propietats de transmitància tèrmica a aquest element.

La Figura 3.16 mostra la creació del sistema constructiu de la façana tipus del període constructiu A (Capítol 2 secció 2.3.3.2). En aquest cas els dos materials necessaris per la concepció del sistema constructiu estan disponibles en la llibreria d'ArchSim, pel que s'han seleccionat directament del menú de materials del component *Layer* i se'ls ha assignat el gruix en metres. Un cop es disposa dels materials necessaris, aquests s'agrupen seguint l'ordre d'exterior a interior en el component *Construction*. En la informació del sistema constructiu generat es pot apreciar la transmitància, així com els diferents materials que el componen amb els seus respectius gruixos

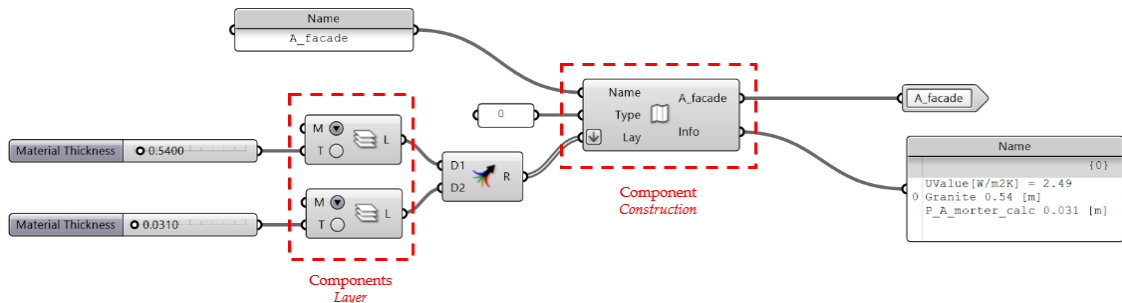


Figura 3.16. Sistema constructiu de la façana del període A generat a partir de materials de la llibreria d'ArchSim

Font. Elaboració pròpia

Tot i disposar en la seva llibreria d'una gran varietat de materials de diferents categories (p. ex. fusta, materials petris, aïllaments, etc.), aquests no sempre s'ajusten als materials específics de cada cas d'estudi com és el cas de l'UBEM d'Escaldes-Engordany. En aquests casos ArchSim disposa de components específics per definir nous materials de construcció. Concretament, ArchSim disposa de dos components per a la creació de materials: un per materials opacs (component *opaques materials*) i un per materials d'envidriament (components *glazing materials*).

En el cas dels materials de construcció de l'embolcall de l'edifici, els materials a utilitzar són els opacs. La Figura 3.17 mostra el component d'ArchSim per a la creació de materials opacs, així com les diverses propietats del material necessàries per definir-lo. Val a dir que, tot i que el component admet diverses propietats per generar nous materials de construcció, no és obligatori disposar de tots els valors. De totes formes, quan millor es defineixi el material, més precisos seran els resultats del model.

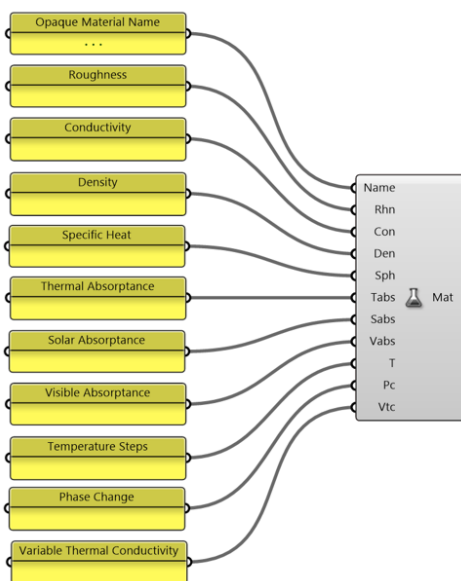


Figura 3.17. Component *Opaque Material* per a la creació de materials de construcció opacs i propietats necessàries

Font: Elaboració pròpia

Una vegada generat el material, s'ha vinculat al component *Layer* i se li ha assignat el gruix per conformar el material de construcció, d'igual manera que quan es selecciona el material de la llibreria d'ArchSim. La Figura 3.18 presenta la generació del sistema constructiu corresponent a la mitgera tipus del període A. Per aquest s'han creat tres materials mitjançant les propietats definides en la fase de caracterització (Capítol 2 secció 2.3.3.2).

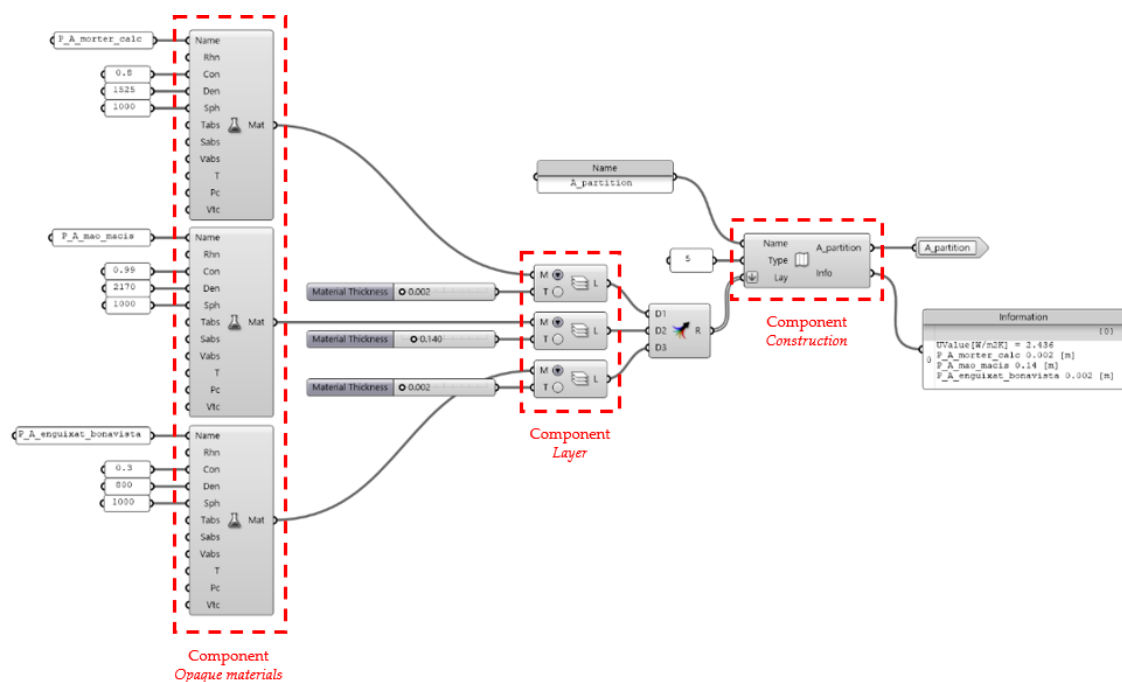


Figura 3.18. Sistema constructiu corresponent a la mitgera del període A mitjançant materials de construcció creats amb ArchSim

Font. Elaboració pròpia

En l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ha generat un sistema constructiu per cadascun dels tancaments dels edificis per les cinc períodes identificats en la fase de caracterització, és a dir un total de 26 sistemes que apliquen a diferents element de l'embolcall, tal com s'aprecia en la Figura 3.19.

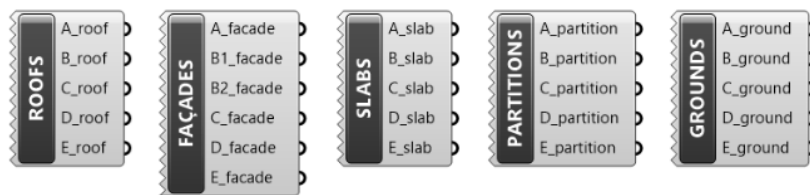


Figura 3.19. Sistemes constructius generats en l'UBEM d'Escaldes-Engordany organitzats segons tipus

Font. Elaboració pròpia

3.2.3.1.2 Horaris d'utilització

En l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ha generat un horari d'utilització anual per cadascun dels clústers i àmbits, representant un total de 32 horaris d'ús tal com es presenta en la Figura 3.20.

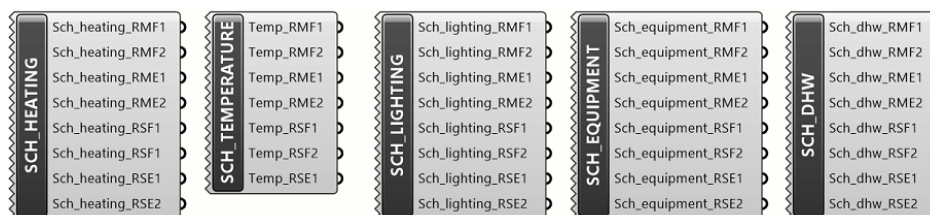


Figura 3.20. Horaris d'ús generats en l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

La generació dels horaris anuals d'utilització de cadascun dels sistemes i aparells elèctrics definits en la fase de caracterització (Capítol 2 secció 2.3.3.3) s'ha realitzat a través dels diferents components de la categoria *Schedules*. Tots els horaris parteixen dels resultats de les respostes de l'enquesta fins a l'obtenció d'un horari anual compostat per 8 760 valors. Val a dir que, degut a la particularitat d'alguns d'aquests, la seva generació és diferent en funció de l'àmbit al que apliquen. A continuació es detalla el procés realitzat per cadascun dels horaris generats.

- **Il·luminació**

Per generar l'horari d'utilització de la il·luminació, primerament, i mitjançant el component *Day Schedule*, s'han establert dos horaris d'utilització diaris (per dies laborables i per caps de setmana) definits en la fase de caracterització (veure Capítol 2 Figura 2.22). Amb aquests dos horaris diaris s'ha definit la setmana tipus formada pels 7 dies de la setmana ordenats de diumenge a dissabte mitjançant el component *WeekSchedule*. Aquesta s'ha definit multiplicant l'horari d'utilització diari en dies laborables per 5, i el de caps de setmana per 2 conformant així la setmana completa. Finalment, s'ha determinat el període de l'any al qual s'atribueix la setmana, per conformar l'horari d'utilització anual amb el component *YearSchedule*. En el cas de la il·luminació, al no disposar de més informació, s'ha definit una única setmana comuna per tot l'any. La Figura 3.21 mostra l'*script* realitzat per generar l'horari d'utilització del clúster RMF1.

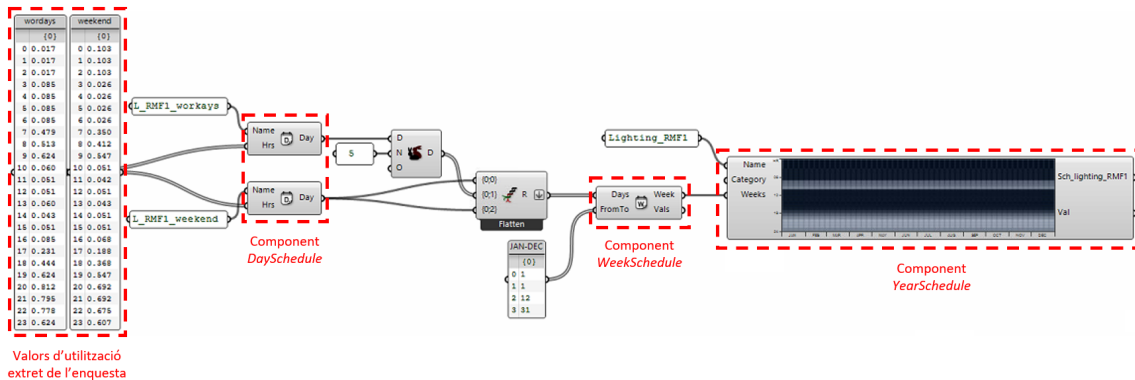


Figura 3.21. Generació de l'horari d'utilització de la il·luminació pel clúster RMF1

Font. Elaboració pròpia

Val a dir que per l'ocupació s'ha establert l'horari d'utilització definit per la il·luminació atès que és una informació molt sensible per ser demanada directament en una enquesta.

- **Calefacció**

En el cas de la calefacció, al ser un sistema d'ús estacionari, la generació del seu horari d'utilització presenta certes diferències respecte altres àmbits. Tal com es mostra en la Figura 3.22, a banda dels dies laborables i els caps de setmana definits prèviament en la fase de caracterització (Capítol 2 Figura 2.24), per recrear el període durant el qual la calefacció no està en ús s'ha definit un període en el qual la utilització és 0. Igual que en l'horari d'utilització de la il·luminació, mitjançant la combinació dels horaris diaris es confeccionen els horaris setmanals. En aquest cas, al no cobrir la calefacció un període continu al llarg de l'any, s'han definit dos horaris setmanals, un per cobrir el període durant el qual la calefacció està en ús, i un per definir el període de l'any durant el qual la calefacció no s'utilitza, en base a les dades extretes de l'enquesta (veure Capítol 2 Taula 2.11). Finalment aquests períodes es combinen ordenats cronològicament per conformar l'horari anual en el component *YearSchedule*.

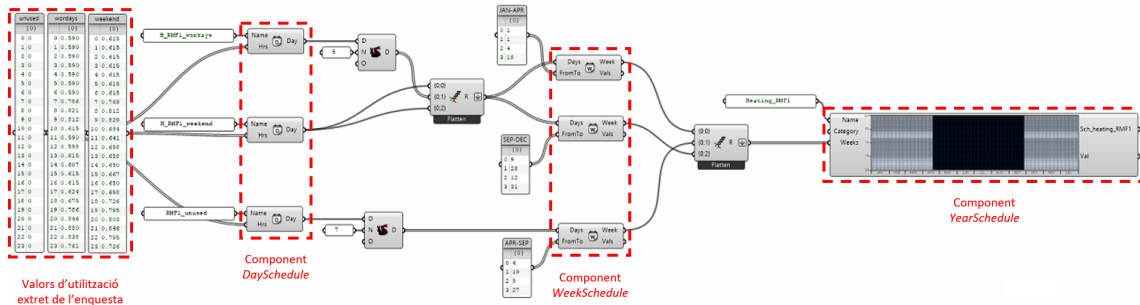


Figura 3.22. Generació de l'horari d'utilització de la calefacció pel clúster RMF1

Font. Elaboració pròpia

A més de l'horari d'utilització, per a la calefacció s'han generat també els horaris de la temperatura a la qual es regula el termòstat. ArchSim permet definir la temperatura de consigna de la calefacció tant a través d'un únic valor constant al llarg de tot el dia, com mitjançant un horari amb diferents temperatures segons el moment del dia. En l'UBEM d'Escaldes-Engordany, al disposar d'informació de les enquestes diferenciant la temperatura del termòstat durant el dia i durant la nit, s'ha pogut definir la temperatura de consigna de la calefacció a escala horària. Per establir la temperatura durant el dia s'han considerat els horaris de 8 a 22 h, mentre que per la temperatura durant la nit de 22 a 8 h. La Figura 3.23 mostra l'horari de regulació de la temperatura del termòstat generat pel clúster RMF1.

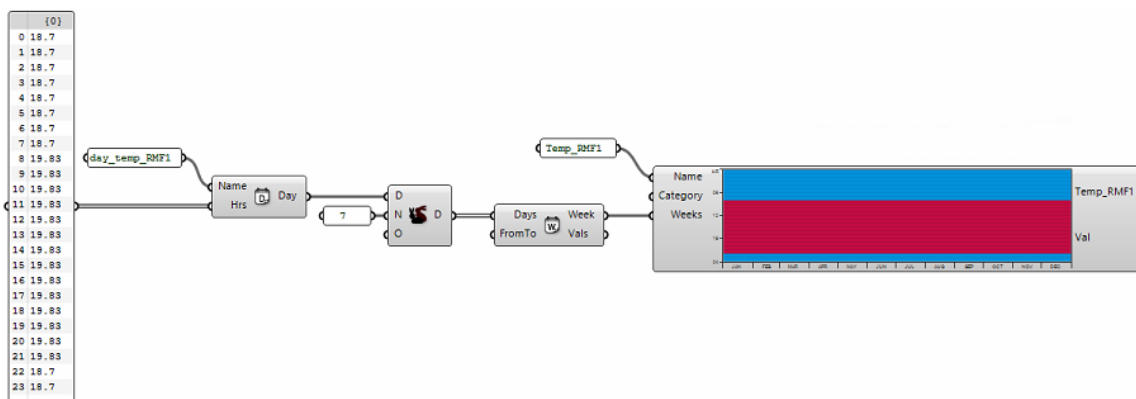


Figura 3.23. Generació de l'horari de regulació de la temperatura de consigna del termòstat del clúster RMF1

Font. Elaboració pròpia

- **Aparells elèctrics**

En el cas dels aparells elèctrics, la generació dels horaris d'utilització ha estat més complexa. La seva principal particularitat és que aquest grup es compon dels horaris d'utilització d'aparells elèctrics totalment diferents, tant pel que fa a les seves corresponents potències, com a les seves utilitzacions. Alguns d'aquests s'utilitzen diàriament, ja sigui de manera constant al llarg del dia o bé en moments puntuals del dia, mentre que d'altres tant sols s'utilitzen certs dies a la setmana (Capítol 2 Taula 2.9).

La Figura 3.24 mostra l'*script* generat per definir l'horari d'utilització dels aparells elèctrics per al clúster RMF1. A diferència dels horaris d'utilització de la il·luminació o la calefacció, en aquest cas s'han definit 7 horaris d'utilització diaris, un per cada dia de la setmana, per tal de replicar les diferents utilitzacions dels aparells elèctrics. Primerament s'han detallat els horaris d'utilització de cadascun dels aparells elèctrics per separat tant en dies laborables com en caps de setmana definits en la caracterització (Capítol 2 Figura 2.23). A continuació, com que no tots els aparells elèctrics tenen la mateixa rellevància en la potència total considerada en la definició, s'han ponderat els horaris de cada aparell elèctric en funció de la seva proporció respecte a la potència total. Per exemple, en el cas del refrigerador que acostuma a estar en ús les 24 hores del dia i els 365 dies de l'any, s'ha fixat a 1,00 les 24 hores del dia però, en el cas del clúster RMF1, en termes de potència tant sols representa l'1,43% de la definida en aquest clúster. Per tant, el seu horari s'ha ponderat en funció d'aquest percentatge, i successivament per tots els aparells elèctrics de cadascun dels clústers. Les ponderacions de cadascun dels aparells elèctrics i clústers es detallen en la Taula F.3 de l'Annex F.

Posteriorment s'han conformat els horaris diaris sumant els horaris dels diferents aparells elèctrics segons el seu ús setmanal (Capítol 2 Taula 2.9). Una vegada definits els horaris diaris pels diferents dies de la setmana, aquests s'han agrupat per generar l'horari setmanal. Igual que en el cas de la il·luminació, al no disposar d'informació més detallada, s'ha generat un únic horari setmanal igual al llarg de l'any per generar l'horari anual.

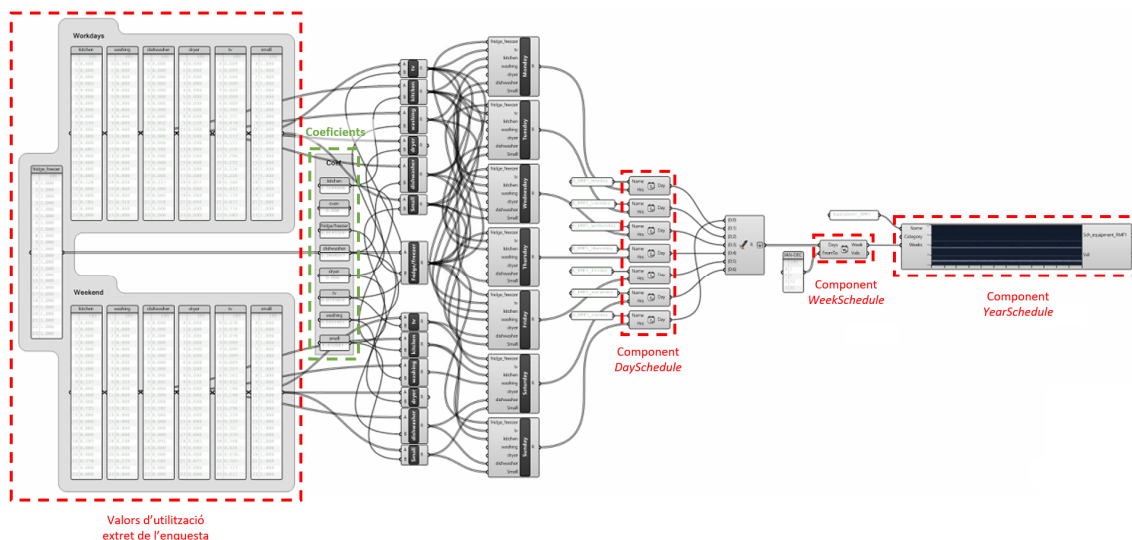


Figura 3.24. Generació de l’horari d’utilització dels aparells elèctrics pel clúster RMF1

Font. Elaboració pròpia

- **ACS**

L’horari d’utilització de l’ACS també té una complexitat afegida. La particularitat d’aquest horari d’utilització és que, tot i disposar de dades de la temperatura de l’aigua de la xarxa a escala mensual, ArchSim tant sols permet definir un únic valor d’aquesta de forma no-paramètrica. Això implica que si s’utilitzés el valor de temperatura mitjà, en alguns mesos l’energia requerida per escalfar l’aigua es sobreestimaria mentre que per d’altres es subestimaria. Per tal de representar de forma més acurada aquesta variabilitat, s’ha definit com a temperatura de la xarxa el valor mensual més baix, i s’ha aplicat un coeficient corrector als horaris extrets de les enquestes segons el mes per tal de compensar la diferència de temperatura. El càlcul dels coeficients correctors aplicats en els horaris d’ACS es detallen en l’Annex G.

La Figura 3.25 presenta l’script generat per definir l’horari d’utilització de l’ACS del clúster RMF1. En aquesta s’aprecia com, en aquest cas, s’ha definit un horari d’utilització diari per cada mes, tant pels dies laborables com en caps de setmana, és a dir un total de 24 horaris d’utilització diaris. Per definir-los, s’ha multiplicat l’horari d’utilització extret de les enquestes en la fase de caracterització pels coeficients correctors de la temperatura de xarxa. Per definir les setmanes, igual que en el cas de la il·luminació, els horaris d’utilització diaris s’han multiplicat per 5, i els de cap de setmana per 2, generant així els 7 dies de la setmana. Els 24 horaris diaris s’han combinat en 12 horaris setmanals, un per cada mes, precisant per cadascun d’aquests el dia i mes d’inici, així com el dia i mes de finalització. Finalment, els

12 horaris setmanals s’han combinat ordenats de gener a desembre en el components *YearSchedule* generant l’horari d’utilització anual.

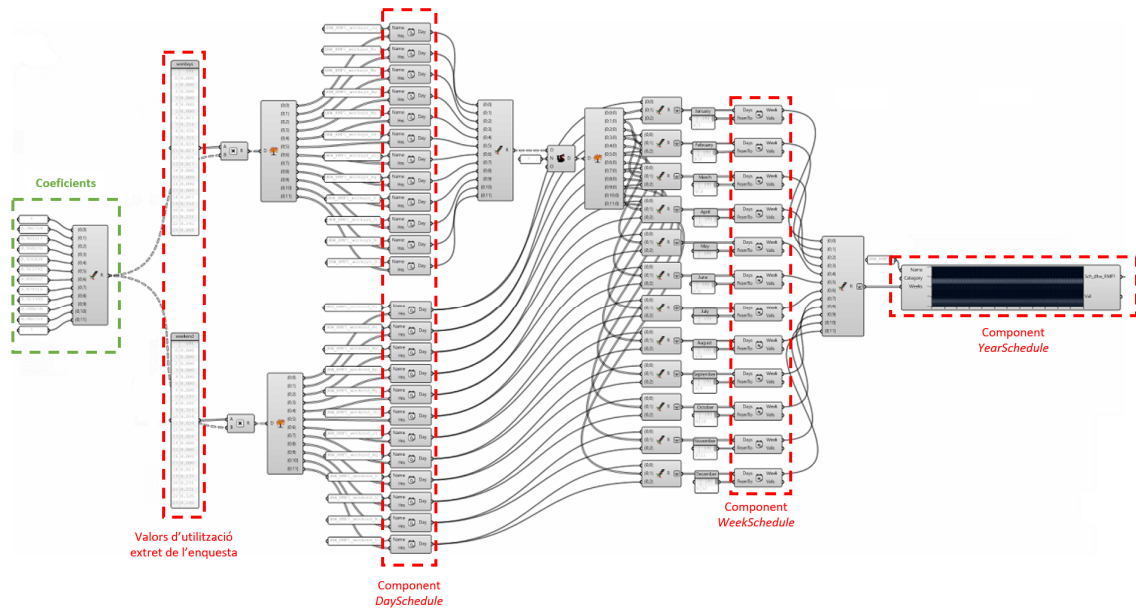


Figura 3.25. Generació de l’horari d’utilització de l’ACS pel clúster RMF1

Font. Elaboració pròpia

3.2.3.2 Configuració de les finestres

Pel que fa a l’assignació de propietats no-geomètriques de les finestres, el procediment és molt similar al de les zones tèrmiques. ArchSim disposa d’un component específic per les finestres, el component *Window*, que permet assignar les seves corresponents propietats.

En l’UBEM d’Escaldes-Engordany s’han configurat 5 components (veure Figura 3.26) per poder definir les propietats de les finestres en cada període constructius (Capítol 2 Taula 2.2).

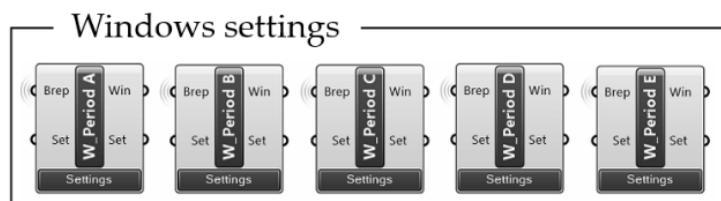


Figura 3.26. Components *Windows* configurats en l’UBEM d’Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

Una vegada associades les geometries representant les finestres de les zones tèrmiques als seus corresponents components, s’han configurat els principals elements que caracteritzen una finestra: el marc i el vidre. Igual que en la configuració de les zones tèrmiques, en la configuració de les finestres també es contemplen dades paramètriques i no paramètriques. En aquest cas les propietats paramètriques són les relacionades amb el vidre. De la mateixa manera que ArchSim permet crear sistemes constructius també permet crear envidriaments en el supòsit que cap dels continguts en la llibreria correspongui a les necessitats del cas d’estudi. La Figura 3.27 mostra la generació del vidre de la finestra tipus del període constructiu A.

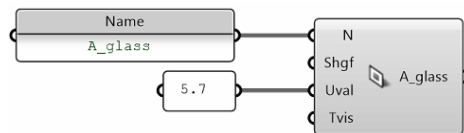


Figura 3.27. Component *Glazing Material* per a la creació de materials de construcció de vidre de les finestres del període A

Font: Elaboració pròpia

Per l’UBEM d’Escaldes-Engordany s’han creat 5 tipus de vidres, un per cada període constructiu tal com es mostra en la Figura 3.28.

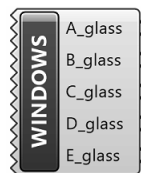


Figura 3.28. Vidres generats en l’UBEM d’Escaldes-Engordany

Font: Elaboració pròpia

3.2.3.3 Configuració del terreny

Pel que fa al MDE importat, no se li ha assignat cap propietat, sinó que s’ha definit com un element d’ombra mitjançant el component *Shading Surface*.

És important comentar que, tot i haver pogut importar el MDE en Grasshopper així com vincular-lo al model d’Escaldes-Engordany, aquest no s’ha pogut incloure durant les simulacions. Els recursos informàtics disponibles per la realització de l’UBEM d’Escaldes-Engordany no han estat suficients per realitzar les simulacions incloent el MDE.

3.2.4 Generació del model tèrmic i assignació del fitxer climàtic

Un cop importats i definits els elements geomètrics amb les seves corresponents propietats no-geomètriques, aquests s'han unit mitjançant el component *Zone Connectivity Network (Networker)* generant el model tèrmic a simular. La Figura 3.29 mostra de manera general l'*script* realitzat per la generació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany. En aquesta s'aprecia com els diferents elements geomètrics del model (zones tèrmiques residencials, no-residencials, finestres i terreny) importats de Rhinoceros es vinculen als seu respectius components els quals assignen les corresponents propietats no-geomètriques. Prèviament, les zones tèrmiques, tant residencials com no-residencials, s'intersequen per tal de diferenciar les parets mitgeres de les façanes, així com les soleres i cobertes dels forjats. En la Figura 3.29 també s'aprecien les diverses propietats paramètriques generades (sistemes constructius de l'embolcall, vidres i horaris d'utilització) vinculades a la llibreria per poder ser utilitzades en els components. Finalment, tots els components, així com la llibreria, es combinen en el component *Connectivity network* creant el model tèrmic.

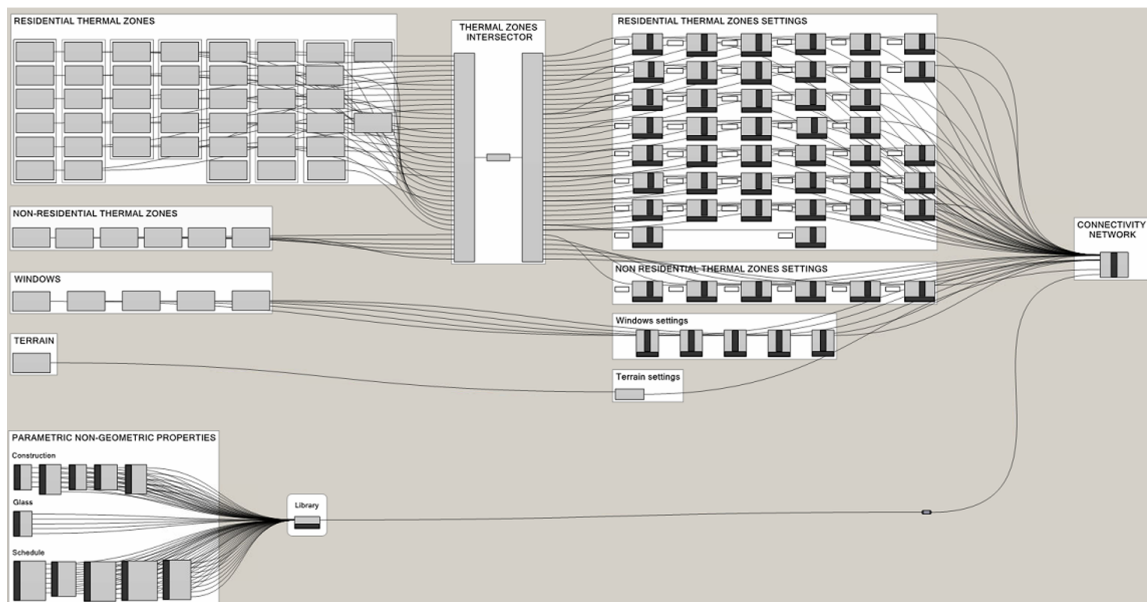


Figura 3.29. Vista general de l'*script* generat per implementar l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

El darrer element afegit al model abans d'iniciar la simulació ha estat el fitxer climàtic. Aquest s'afegeix mitjançant el component *Simulation*, al qual també es vincula el model, tal com es mostra en la Figura 3.30.

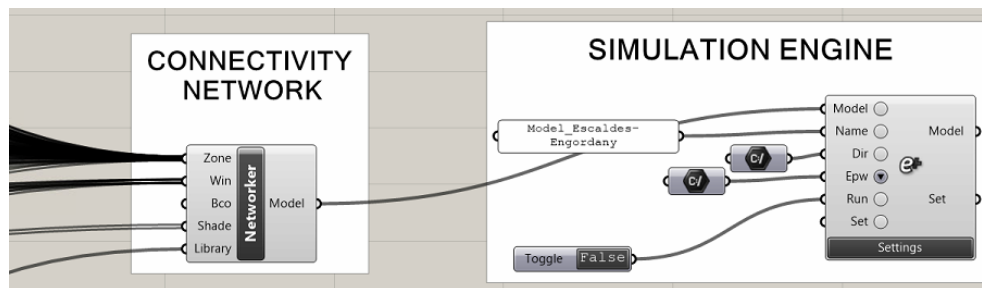


Figura 3.30. Vinculació del fitxer climàtic i el model tèrmic al motor de simulació

Font. Elaboració pròpia

Una vegada que el model i els fitxer climàtic estan connectats al component *Simulation*, es dona per finalitzada la fase de generació i es procedeix a realitzar les simulacions.

3.3 Referències

- Aguiaro, G., Benner, J., Cipriano, P., & Nouvel, R. (2018). The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40965-018-0042-y>
- Baetens, R., De Coninck, R., Jorissen, F., Picard, D., Helsen, L., & Saelens, D. (2015). Openideas - An open framework for integrated district energy simulations. *14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings, September*, 347–354. <https://doi.org/10.26868/25222708.2015.2243>
- Bison. (2018). *Bison. Component Reference*. <https://www.bison.la/>
- Bueno, B., Nakano, A., & Norford, L. (2015). Urban weather generator: a method to predict neighborhood-specific urban temperatures for use in building energy simulations. *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*, i.
- Cerezo Davila, C., Reinhart, C. F., & Bemis, J. L. (2016). Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets. *Energy*, 117, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.057>
- Chen, Y., & Hong, T. (2018). Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models. *Applied Energy*, 215(January), 717–735. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.073>

- Dall'ó', G., Galante, A., & Torri, M. (2012). A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy and Buildings*, 48, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.034>
- Dogan, T. (2013). *ArchSim Energy Modeling*. <https://tkdogan.gitbooks.io/archsim-primer/content/WhatIsThisAbout.html>
- Ferrando, M., Causone, F., Hong, T., & Chen, Y. (2020). Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities and Society*, 62(July), 102408. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408>
- Firth, S. K., & Lomas, K. J. (2009). Investigating CO2 emission reductions in existing urban housing using a community domestic energy model. *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, 2098–2105.
- Fonseca, J. A., Nguyen, T. A., Schlueter, A., & Marechal, F. (2016). City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy and Buildings*, 113, 202–226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.055>
- Hong, T., Chen, Y., Lee, S. H., & Piette, M. A. (2016). CityBES: A Web-based Platform to Support City-Scale Building Energy Efficiency environment. *Urban Integrated System, August*, 107–111.
- IOP. (2019). *Thermal modelling*. <https://www.iop.org/explore-physics/physics-around-you/sustainable-building/thermal-modelling#gref>
- Johari, F., Peronato, G., Sadeghian, P., Zhao, X., & Widén, J. (2020). Urban building energy modeling: State of the art and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128(April). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109902>
- Marschall, M., Tahmasebi, F., & Burry, J. (2019). Including occupant behavior in building simulation: Comparison of a deterministic vs. a stochastic approach. *Simulation Series*, 51(8), 185–188.
- Nouvel, R., Brassel, K.-H., Bruse, M., Duminil, E., Coors, V., Eicker, U., & Robinson, D. (2015). SIMSTADT , a New Workflow-driven Urban Energy Simulation Platform for CityGML City Models. *CISBAT 2015 - Lausanne, Switzerland, September*, 889–894.
- Polly, B., Kutscher, C., Macumber, D., & Schott, M. (2016). From Zero Energy Buildings to Zero Energy Districts. *2016 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, August*, 1–16. https://www.researchgate.net/publication/307955877_From_Zero_Energy_Buildings_to_Zero_Energy_Districts

- Reinhart, C. F., & Cerezo Davila, C. (2016). Urban building energy modeling - A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- Reinhart, C. F., Dogan, T., Jakubiec, J. A., Rakha, T., & Sang, A. (2013). UMI - An urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, 476–483. <https://doi.org/10.26868/25222708.2013.1404>
- Remmen, P., Lauster, M., Mans, M., Fuchs, M., Osterhage, T., & Müller, D. (2018). TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. *Journal of Building Performance Simulation*, 11, 84–98. <https://doi.org/10.1080/19401493>
- Robinson, D., Campbell, N., Gaiser, W., Kabel, K., Le-Mouel, A., Morel, N., Page, J., Stankovic, S., & Stone, A. (2007). SUNtool - A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability. *Solar Energy*, 81(9), 1196–1211. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.06.002>
- Robinson, D., Haldi, F., Kämpf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., & Wilke, U. (2009). Citysim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009, July*, 1083–1090.
- Smith, L. (2012). Beyond the shoebox: Thermal zoning approaches for complex building shapes. *ASHRAE Transactions*, 118(PART 2), 141–148.

4 SIMULACIÓ DEL MODEL I VALIDACIÓ DELS RESULTATS

El Capítol 4 es centra en la darrera etapa del procés d'implementació dels UBEM: la simulació del model, el tractament i presentació dels resultats, així com la seva validació. D'igual forma que en els capítols previs, inicialment es presenta l'estat de l'art específic d'aquesta fase, seguit del procediment realitzat en l'UBEM d'Escaldes-Engordany.

4.1 Estat de l'art

Una vegada generades i combinades les dades en el model tèrmic, aquest s'ha d'executar per obtenir els seus resultats que, posteriorment, caldrà comunicar de manera clara i comprensible. Tal com mostra la Figura 4.1, tot i ser una fase totalment independent en el procés d'implementació d'un UBEM, la simulació i el posterior tractament i presentació dels seus resultats, formen part del flux de treball de les eines de generació vistes en el Capítol 3.

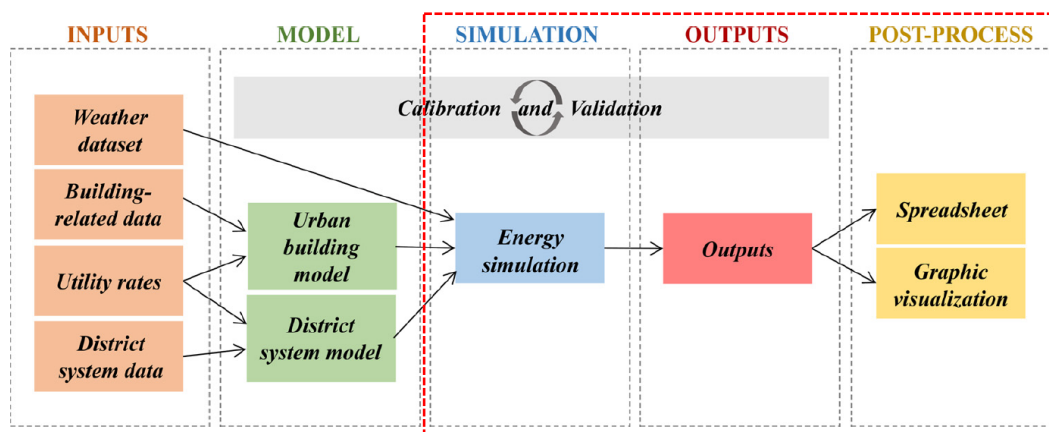


Figura 4.1. Flux de treball de les eines de generació d'UBEM (en vermell les etapes tractades en el present capítol)

Font. Ferrando et al. (2020)

A banda de la simulació i generació dels resultats, aquest flux inclou també la seva validació, imprescindible per conèixer el nivell de confiança dels resultats obtinguts.

4.1.1 Simulació del model: eines i productes resultants

La simulació de models energètics multi-zonals de centenars o inclús milers d'edificis així com el tractament dels volums de dades resultants suposen un gran repte. Mentre que les simulacions de simples models uni-zonals estàtics per varis milers d'edificis poden ser executats en qüestió d'hores en ordinadors personals, l'execució de models multi-zonals dinàmics poden arribar a trigar dies (Reinhart & Cerezo Davila, 2016).

Al llarg de la darrera dècada s'han desenvolupat nombroses eines de simulació que difereixen entre elles en el càlcul de la demanda energètica dels edificis, la seva disponibilitat (comercial, *freeware* o codi obert), i els formats de dades, entre altres. La Figura 4.2 presenta les principals eines de simulació utilitzades en el camp d'estudi dels UBEM identificades en una revisió taxonòmica de 72 articles realitzada per Malhotra et al. (2022). L'eina de simulació més freqüent és l'EnergyPlus^{4.1} així com les seves extensions utilitzades en el 38% dels articles revisats, seguida de l'eina INSEL^{4.2} utilitzada en un 11%, Modelica^{4.3} en un 6%, Matlab/Simulink^{4.4} en un 5%, així com TRNSYS^{4.5} i IDA ICE^{4.6} en un 4% i un 3%, respectivament.

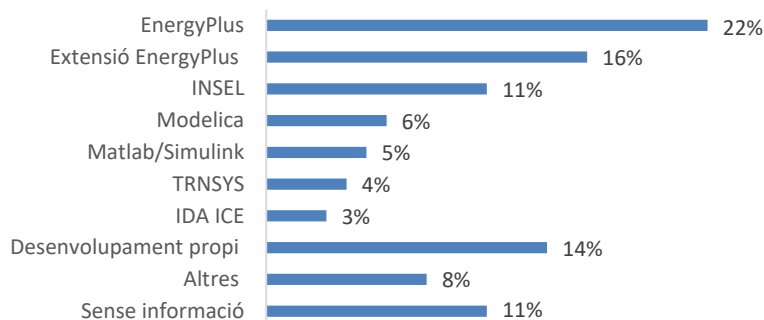


Figura 4.2. Principals eines de simulació utilitzades en el camp d'estudi dels UBEM

Font. Elaboració pròpia basat en Malhotra et al. (2022)

Val a dir que tot i que l'article identifica un total de 25 eines de simulació utilitzades en diferents tipus d'UBEM, des de simples models estacionaris fins a models dinàmics més complexos, la Figura 4.2 tant sols n'enumera 7 d'elles agrupant les menys habituals en la

^{4.1} Més informació a <https://energyplus.net/>

^{4.2} Més informació a https://www.insel.eu/en/home_en.html

^{4.3} Més informació a <https://modelica.org/index.html>

^{4.4} Més informació a <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>

^{4.5} Més informació a <https://www.trnsys.com>

^{4.6} Més informació a <https://www.equa.se/en/ida-ice>

categoria “Altres”. També hi ha una important quantitat d’UBEM, concretament un 14%, que utilitzen eines de simulació pròpies.

Un altre aspecte important de la fase de simulació són els resultats obtinguts d’aquesta. Tot i que la simulació s’efectua generalment amb l’ajut d’una segona eina, és a dir un motor de simulació extern, és l’eina de generació l’encarregada de gestionar la interoperabilitat amb aquest (Ferrando et al., 2020). Generalment l’eina de simulació ve donada per l’eina de generació escollida, pel que els productes resultants de la simulació dependran no només del motor de càlcul sinó també de l’eina de generació utilitzada.

Amb l’aparició de les noves eines de generació i simulació, així com amb la constant evolució de les existents, els resultats proporcionats pels UBEM són cada vegada més amplis. La Taula 4.1 resumeix els principals resultats que es poden obtenir de la simulació d’UBEM mitjançant les eines de generació prèviament tractades en la secció 3.1.2.1 del Capítol 3, detallant l’eina de simulació que utilitzen cadascuna d’aquestes. La Taula 4.1 també inclou altres característiques dels resultats de les simulacions com les possibles resolucions, tant temporals com espacials, i els formats en els quals s’obtenen.

Els resultats essencials en qualsevol eina de generació són els relacionats amb els usos energètics dels edificis, en particular la demanda tèrmica a aportar pels sistemes de climatització, l’ACS, així com els consums elèctrics corresponents a la il·luminació i als aparells elèctrics. A més d’aquests, algunes eines permeten obtenir altres tipus de resultats com l’anàlisi de potencial de recursos i il·luminació naturals, així com altres anàlisis a gran escala.

Entre els anàlisis de potencial dels recursos naturals, el més habitual és el de potencial solar, sobretot en les teulades dels edificis, tot i que algunes eines també permeten analitzar el de les façanes. A més, algunes incorporen opcions per analitzar el potencial d’altres recursos com per exemple l’eòlic o l’hídric, ja implementats en l’eina URBANopt (Kontar et al., 2020), o la geotèrmia en el cas de l’eina CEA (Fonseca et al., 2016).

Referent als anàlisis a gran escala, els més freqüents són els anàlisis comparatius d’escenaris en els quals s’implementen diferents mesures d’eficiència i estalvi energètic, o també l’avaluació d’emissions de GEH. Com a exemple, l’eina CityBES que inclou 75 mesures d’estalvi energètic per defecte per incorporar en els UBEM, i l’eina CEA que permet realitzar anàlisis cost-benefici de les estratègies d’eficiència i reducció energètica implementades en els models. A més, la versió més actual d’aquesta darrera permet realitzar anàlisis de mobilitat elèctrica, igual que l’eina CitySim que també inclou la possibilitat de realitzar anàlisis de mobilitat a través de l’eina MATSim^{4.7}.

^{4.7} Més informació a <https://www.matsim.org/>

Un aspecte important pel que fa als resultats de les simulacions és la resolució temporal i espacial d'aquests. En el cas de les resolucions temporals, en funció de l'eina es poden obtenir resultats anuals, mensuals, diaris, horaris o fins i tot minutals, com és el cas de CityBes i OpenIDEA. En quant a la resolució espacial dels resultats, actualment les eines presenten menys possibilitats que consisteixen principalment en resultats per grups d'edificis o a escala d'edifici. Val la pena destacar que l'obtenció de resultats a escales més petites que l'edifici encara no són possibles en la majoria de les eines actuals. Com s'ha comentat en el Capítol 3, l'eina de generació ArchSim utilitzada en l'UBEM d'Escaldes-Engordany és una de les poques que permet l'obtenció dels resultats de les simulacions a escales més petites que la d'edifici, una de les raons principals pel que s'ha decidit utilitzar-la.

Per últim, el format de sortida és també un aspecte rellevant relacionat amb els resultats de les simulacions. Com es presenta en la Taula 4.1, el format més habitual d'exportació dels resultats és el .csv, acrònim de l'anglès *comma-separated value*, tot i que algunes eines també permeten obtenir resultats en format gràfic.

Algunes eines també permeten realitzar anàlisis de sistemes energètics com les xarxes de calor i fred. Val a dir que no s'hi entra en detall en aquest document ja que són anàlisis habitualment vinculats als USEM, fora de l'objecte de la present tesi doctoral.

Com s'ha mencionat al Capítol 3 secció 3.1.2.1, les eines de generació estan en continu desenvolupament i es preveu que les properes versions comptin amb novetats també pel que fa als resultats de les simulacions.

Resultats		CitySim	SimStadt	umi	CityBES	OpenIDEA	CEA	URBANopt	TEASER	ArchSim
Eina de simulació	EnergyPlus			X	X			X		X
	CitySim solver	X								
	FastBuildings					X				
	INSEL		X							
	Modelica								X	
	Auto-desenvolupament						X			
Relacionats amb l'edifici	Llum natural	X		X				X		X
	Calefacció/refrigeració	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Aigua calenta sanitària	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Usos elèctrics	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Potencial de recursos	Solar Teulades		X	X	X		X	X		X
	Façanes			X			X			
	Altres						S	X		
Avaluacions a gran escala	Escenaris	X	X		X		X	X		
	Comparació				X		X			
	Cost-benefici				X		X			X
	Transport/mobilitat	X(MATsim-T)		X			X			
	Anàlisi de cicle de vida	X	X	X			X			
	Alimentació			X						
Resolució Temporal	Minutal				X	X				
	Horària	X			X	X	X	X	X	X
	Diària	X			X	X	X	X	X	
	Mensual	X			X	X	X	X	X	X
	Anual	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Resolució Espacial	Planta				P (only daylight)					X
	Edifici	X	X	X	X	X	X		X	
	Grup d'edificis	X		X	X	X	X	X	X	
Format	Full de càlcul	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Visualització gràfica	X	X	X	X		X	X		X

X = funció o característica disponible en l'actualitat; P = funció o característica parcialment; S = funció o característica en desenvolupament

Taula 4.1. Resum dels possibles resultats de les simulacions de les principals eines de generació

Font. Elaboració pròpia amb dades de Ferrando et al. (2020) i Malhotra et al. (2022)

4.1.2 Anàlisi i visualització dels resultats

Els resultats dels UBEM s'han de poder comunicar als usuaris o destinataris de manera clara i intel·ligible mostrant les variacions del consum tant de forma espacial com temporal. Moltes de les eines de generació existents ofereixen la possibilitat d'obtenir els resultats del model en forma de gràfic (veure Taula 4.1). No obstant, tot i permetre un primer anàlisi

exploratori dels resultats de manera ràpida, les funcions de visualització de les eines de generació són en general bastant limitades.

Una de les eines que més ha desenvolupat aquesta part de visualització de resultats és l'eina CityBes. La Figura 4.3 mostra la secció d'aquesta eina destinada a la visualització dels resultats que permet, en base a una sèrie de filtres, mostrar resultats espacialment, així com anàlisis agregats mitjançant gràfics circulars. A més, disposa d'un menú desplegable amb resultats a escala d'edifici.



Figura 4.3. Visualització de resultats de l'eina de generació CityBes

Font. Chen, Hong, & Piette (2017)

Segons l'anàlisi realitzat per Malhotra et al. (2022), les principals visualitzacions dels resultats de les simulacions es poden classificar segons mostra la Figura 4.4: (a) cartografia 2D, (b) gràfics de sèries temporals i (c) cartografia 3D. Les cartografies 2D s'utilitzen gairebé en la mateixa proporció que els gràfics de sèries temporals utilitzats en un 36% i un 34% respectivament, mentre que les cartografies 3D s'utilitzen aproximadament en un de cada cinc articles.

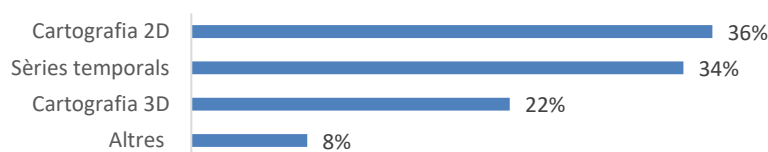


Figura 4.4. Mètodes de visualització de resultats

Font. Elaboració pròpia basada en Malhotra et al. (2022)

Val a dir que el 44% dels articles revisats utilitzen algun mètode de visualització espacial, ja sigui 2D o 3D, el que indica que, o bé els resultats de les simulacions energètiques s'emmagatzemen d'alguna manera en el model o s'utilitzen arxius addicionals per les visualitzacions en els quals s'hi superposen els resultats de les simulacions (Malhotra et al., 2022).

4.1.3 Validació del model

L'habilitat dels models energètics per donar suport a la presa de decisions depèn de la fiabilitat dels seus resultats (Reinhart & Cerezo Davila, 2016). En efecte, tot i que de forma simplificada, els models han de tenir la capacitat de representar els aspectes més significatius dels objectes que representen (Ferrando et al., 2020). En el cas dels UBEM, el procés de modelització consisteix en simplificar de forma estructurada la realitat energètica del parc edificat objecte d'estudi a través de representacions computacionals (Schmitt et al., 2019). És precisament la combinació de simplificacions les que aporten incerteses difícils de quantificar. Segons Naber, Volk, & Schultmann (2017), totes les etapes implicades en la implementació dels UBEM comporten algun tipus d'incertesa, d'aquí la importància de validar els resultats d'aquests. L'avaluació de la precisió d'un UBEM es defineix com l'error de les dades d'ús d'energia simulades quan es comparen amb les dades d'ús d'energia mesurades, i s'indica mitjançant indicadors estadístics (Oraiopoulos & Howard, 2022). Per aquest motiu aquesta secció es centra primerament en les dades d'ús d'energia mesurades i a posteriori en els indicadors de bondat d'ajust.

4.1.3.1 Dades d'ús d'energia mesurades

Igual que en la fase de caracterització (Capítol 2), els UBEM s'enfronten una vegada més en la fase de validació a l'obstacle de la disponibilitat i granularitat de les dades (Naber et al., 2017). Les dades necessàries per poder realitzar la validació dels resultats d'un UBEM no són fàcils d'aconseguir, fet que s'accentua encara més a l'hora de validar resultats desagregats i en resolucions temporals petites com és el cas de les simulacions horàries.

Segons Malhotra et al. (2022), aproximadament un 30% dels UBEM desenvolupats fins a dia d'avui no disposen de validació dels resultats per manca de dades, i un 7% tant sols ha pogut realitzar una validació parcial com s'aprecia en la Figura 4.5.

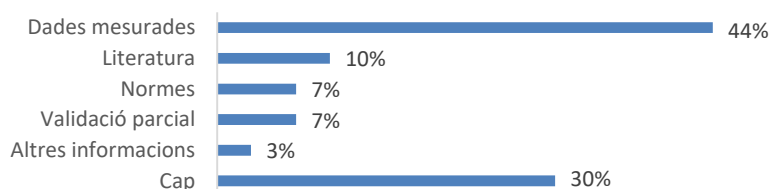


Figura 4.5. Dades més habituals utilitzades en la validació dels UBEM

Font. Elaboració pròpia basada en Malhotra et al. (2022)

Les dades més utilitzades en la fase de validació, concretament en el 44% dels casos, són les de consum mesurades, generalment proporcionades per les companyies de subministrament d'energia. Per exemple, Monteiro, Costa, Pina, Santos, & Ferrão (2018) van col·laborar amb una de les empreses de distribució d'energia de Portugal per obtenir el consum elèctric dels edificis de la zona d'estudi. Dall'O, Galante, & Torri (2012) també van fer servir dades de consum anual de gas de la zona d'estudi proporcionades per la companyia de gas de Carugate a Milà (Itàlia). Malauradament, l'accés i obtenció d'aquestes dades és difícil degut a les estrictes polítiques de confidencialitat de les companyies distribuïdores, motiu pel qual en ocasions cal recórrer a fonts d'informació alternatives.

Una possible alternativa a les dades mesurades són els informes energètics publicats pels diferents governs. Per exemple, Cerezo Davila, Reinhart, & Bemis (2016) van utilitzar les dades de consum energètic dels informes derivats de les enquestes CBECS i RBECS publicats per la EIA per validar els resultats de l'UBEM de Boston. Un altre exemple és l'UBEM de la ciutat d'Osaka al Japó en el qual Shimoda, Fujii, Morikawa, & Mizuno (2004) van utilitzar els consums d'energia agregats per les FY1999 (guies comercials al Japó) amb la finalitat d'estimar els errors dels resultats de la simulació.

Una altra font d'informació per validar els resultats dels UBEM són els portals de dades. Un exemple n'és la validació de l'UBEM de Milà realitzada per Caputo, Costa, & Ferrari (2013) en la qual van utilitzar com a referència els consums totals d'energia publicats pel SIRENA^{4.8}, un sistema d'informació energètica centrat en la regió italiana de Llombardia.

Una altra característica a tenir en compte de les dades utilitzades per la validació és la seva resolució, tant temporal com espacial, que vindrà condicionada no només per la disponibilitat de les dades de validació, sinó també per les resolucions dels resultats de les

^{4.8} Més informació a https://www.finlombarda.it/pianificazione_energetica/sirena

simulacions (Capítol 4 secció 4.1.1). La Figura 4.6 mostra les resolucions temporals de les dades de validació identificades per Malhotra et al. (2022), així com la seva freqüència d'ús. S'aprecia que la resolució més utilitzada és la horària utilitzada en un 36% dels UBEM contemplats en la revisió, seguit de les resolucions mensuals i anuals utilitzades en un 27% i 26% de les validacions, respectivament.

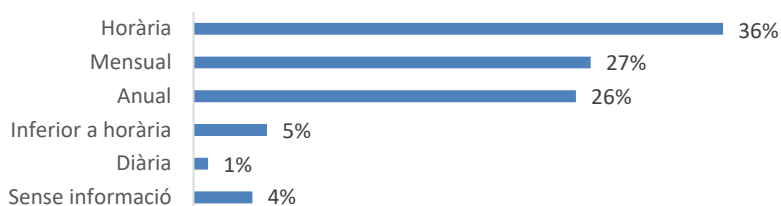


Figura 4.6. Resolució temporal de les dades utilitzades en la validació en UBEM publicats anteriorment

Font. Malhotra et al. (2022)

4.1.3.2 Indicadors de bondat d'ajust

Els indicadors de bondat d'ajust poden anar des d'un simple percentatge representant la diferència entre les dades d'ús d'energia mesurades i simulades, fins a fórmules matemàtiques més complexes concebudes per a identificar aspectes concrets dels models.

Oraiopoulos & Howard (2022) han analitzat els indicadors utilitzats en el camp d'estudi dels UBEM. Entre els més habituals destaquen el coeficient de determinació (R^2), l'error quadràtic mitjà (RMSE, de l'anglès *root-mean-square error*), el coeficient de variació de l'RMSE (CV_{RMSE}), l'error absolut mitjà (MAE de l'anglès *mean absolute error*), i l'error mitjà percentual absolut (MAPE, de l'anglès *mean absolute percentage error*).

Fins l'any 2016, en la majoria d'UBEM, el procediment més usual per definir la seva bondat d'ajust consistia en calcular un únic percentatge avaluant la precisió de milers d'edificis a través d'un únic valor (Filogamo et al., 2014), i a mesura que ha augmentat l'interès en els UBEM, s'han començat a aplicar altres indicadors per comprendre el rendiment d'aquests (Lorimer, 2012). Entre aquests es troben el coeficient de variació (CV), així com el RMSE i el R^2 , o els inclosos en la directriu 14-2002 de l'ASHRAE^{4.9} (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning*), aplicada per primera vegada en el camp d'estudi dels UBEM per Quan et al. (2015), introduint l'error mitjà normalitzat de biaix (NMBE), així com el coeficient de variació de l'error quadràtic mitjà (CV_{RMSE}).

Recentment, s'ha explorat l'aplicació d'un nombre més gran de mesures d'error (cinc o més) amb l'objectiu de proporcionar una millor i més transparent avaluació dels UBEM

^{4.9} <https://www.ashrae.org>

implementats. Tanmateix, la majoria dels indicadors d'ajust ressalten principalment el comportament mitjà dels resultats dels UBEM fallant a l'hora de ressaltar els desajustos en funció del temps, així com en moments de consum punta o vall (p. ex. bondat d'ajust en el moment de demanda màxima horària o diària), els quals són claus per estudis de seguretat dels subministrament d'energia. No obstant, el creixent ús de múltiples indicadors de bondat d'ajust per estimar els desajustos dels UBEM augmenta l'exhaustivitat de les investigacions en el camp d'estudi dels UBEM.

4.1.4 Calibratge o ajust del model

En un intent d'abordar les incerteses associades a la definició dels arquetips, i reduir d'aquesta manera les discrepàncies entre els resultats de les simulacions i la realitat energètica, alguns treballs realitzen una etapa suplementària de calibratge (Kristensen et al., 2017, 2018; Sokol et al., 2017; K. Sun et al., 2016).

Aquesta etapa consisteix en un ajustament de les dades utilitzades en la definició de l'UBEM per a que els resultats de la simulació d'aquest reproduïxin de forma més acurada la realitat energètica del parc edificat. En el cas de disposar de dades de consum mesurades, el mètode més simple de calibratge consisteix en un procés iteratiu d'ajust de certs paràmetres fins a aconseguir una coincidència raonable entre els resultats de les simulacions i les dades observades (Heiple & Sailor, 2008). Existeixen mètodes que introdueixen diferents graus d'automatització minimitzant l'esforç manual i el judici de l'analista. Aquests enfocaments es classifiquen generalment en tres categories: meta-modelatge, optimització i calibratge bayesià (Sokol et al., 2017).

Val a dir que per realitzar un procés de calibratge requereix d'una definició dels arquetips probabilista per poder determinar quin valor dels paràmetres s'ajusta millor a cada arquetip.

4.2 Simulació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany

L'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ha simulat amb el motor de càlcul EnergyPlus (Crawley et al., 2001). Desenvolupat pel *U.S. Department Of Energy*, DOE^{4.10}, EnergyPlus és la principal eina de simulació utilitzada tant en els BEM com en els UBEM. Val a dir que, tot i realitzar la simulació amb una eina externa, és ArchSim qui gestiona la interoperabilitat amb aquesta permetent realitzar la simulació sense haver de canviar de programa.

^{4.10} <https://www.energy.gov/>

Per motius de recursos computacional^{4.11}, per realitzar la simulació dels edificis residencials d'Escaldes-Engordany s'ha dividit el parc edificat en 4 zones com mostra la Figura 4.7.

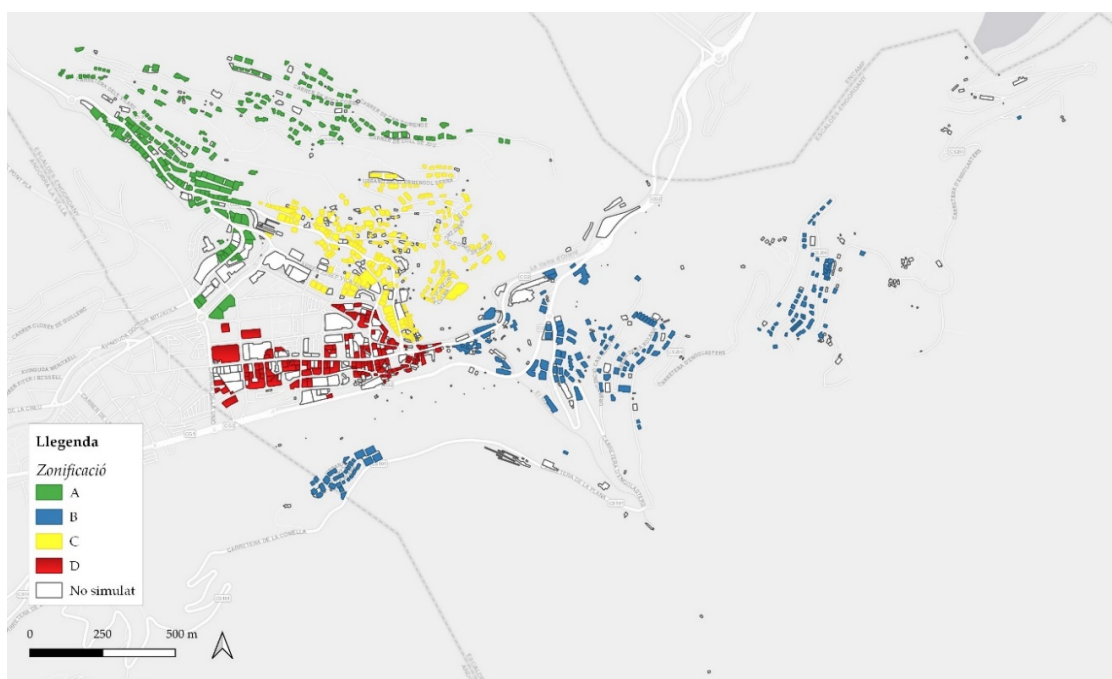


Figura 4.7. Zonificació dels edificis de la parròquia d'Escaldes-Engordany en les simulacions

Font. Elaboració pròpia

4.2.1 Tipologia dels resultats obtinguts

En l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'han simulat els usos energètics d'il·luminació, aparells elèctrics, calefacció i ACS. Els resultats d'aquests s'han obtingut per separat a escala de planta i a una resolució temporal mensual, tot i que les simulacions realitzades en EnergyPlus són horàries. Per fer l'anàlisi així com les visualitzacions, els resultats de l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'han exportat ja que les funcions d'anàlisi de resultats d'ArchSim són molt limitades.

Prèviament a l'anàlisi s'han ajustat dos paràmetres dels resultats que l'eina de generació no té en compte a l'hora d'implementar les simulacions en EnergyPlus i que afecten directament als resultats d'aquestes. El primer és la incorporació dels coeficients de

^{4.11} Simulacions realitzades amb un ordinador personal amb processador Intel® Core(TM) i7-9700 CPU @ 3.00GHz i 16 GB de memòria RAM instal·lada

rendiment dels sistemes de calefacció. Segons la informació extreta de les respostes de l'enquesta (Capítol 2 secció 2.3.3.3), així com a partir de treballs previs, s'han establert els coeficients de rendiment dels equips de producció de calor per cadascun dels vuit clústers resultants de la fragmentació detallats en la Taula 4.2. Per les calderes de fuel domèstic s'han considerat els mateixos rendiments que Travesset-Baro (2017), i pels sistemes d'aerotèrmia els coeficients de rendiment definits per COAA & SaAs (2012).

	RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Sistema de calefacció								
Equip producció	C. fuel domèstic		Radiadors elèctric		C. fuel domèstic		Aerotèrmia	
Període constructiu	A-B-C-D	E	A-B-C-D-E		A-B-C-D	E	A-B-C-D-E	
Coef. rendiment	0,85	0,95	1,00		0,85	0,95	2,3	

Taula 4.2. Coeficients de rendiment utilitzats segons clúster i període constructiu per cadascun dels equips de producció de calefacció considerats

Font. Elaboració pròpia amb dades de Travesset-Baro (2017) i COAA & SaAs (2012)

El segon és l'ajust de la superfície de les volumetries considerada en les simulacions. Les superfícies de la volumetria dels edificis inclouen superfícies destinades a altres usos residencials que no formen part dels habitatges com zones comunes, locals tècnics, terrasses, trasters o aparcaments, entre d'altres, el que comporta una sobreestimació del consum resultant de l'UBEM. Per ajustar les superfícies considerades s'ha calculat un coeficient corrector per cadascuna de les plantes residencials en base a la superfície destinada a habitatge extreta del cadastre i la superfície total de cadascun dels polígons de la volumetria.

4.2.2 Resultats de l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Segons els resultats obtinguts en la simulació de l'UBEM, el parc edificat residencial d'Escaldes-Engordany té un consum total anual de 157 036 MWh repartit al llarg de l'any tal com mostra la Figura 4.8. En aquesta s'aprecia que els mesos amb major consum són els d'hivern degut a l'ús de la calefacció arribant al màxim el mes de gener amb 26 364 MWh, mentre que l'agost és el que presenta el menor consum energètic amb 2 836 MWh.

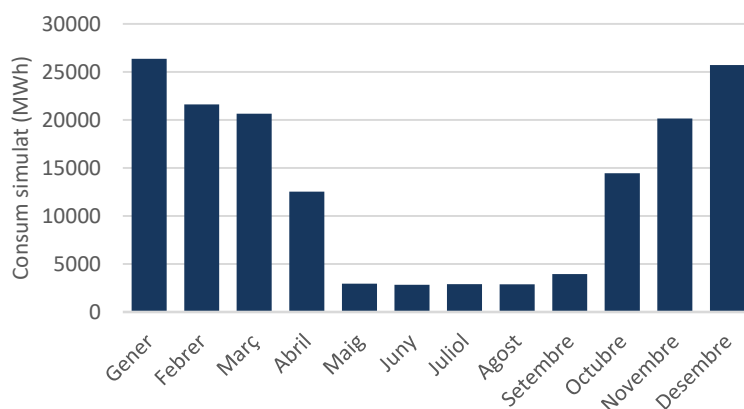


Figura 4.8. Consum d'energia mensual simulat en l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

Tal com s'ha descrit al Capítol 2 secció 2.2.4.1, els habitatges d'Escaldes-Engordany utilitzen principalment dos fonts d'energia: l'electricitat i el fuel domèstic. La Figura 4.9 mostra els resultats de l'UBEM en base a aquestes dues fonts energètiques. S'aprecia que el major consum de fuel domèstic es produeix en els mesos d'hivern durant els quals el sistema de calefacció està en ús, i en menor mesura durant els mesos d'estiu on només s'utilitza per l'ACS. Pel que fa a l'electricitat, també s'aprecia un major ús durant els mesos d'hivern tot i que és molt més constant al llarg de l'any que el fuel domèstic atès que els habitatges amb calefacció elèctrica són molt menys nombrosos.

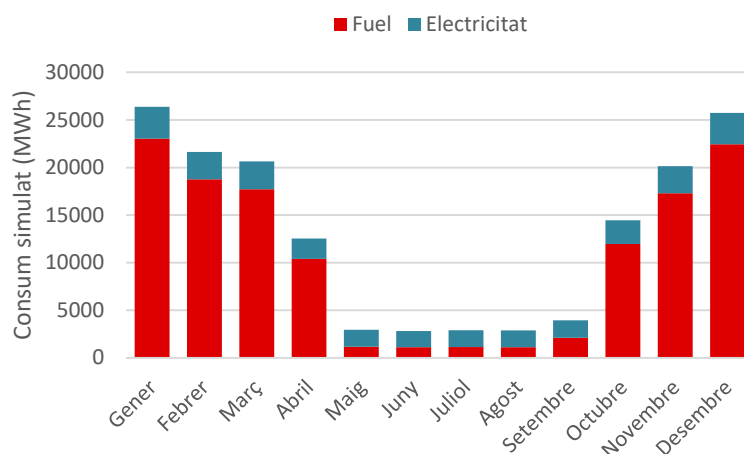


Figura 4.9. Consum d'energia mensual simulat en l'UBEM d'Escaldes-Engordany segons la font d'energia

Font. Elaboració pròpia

Pel que fa al consum segons els usos energètics, en la Figura 4.10 s'aprecia que la calefacció és el que presenta major consum d'energia arribant al 80% del consum total energètic en els mesos de més fred com són desembre i gener, seguit dels aparells elèctrics, l'ACS i la il·luminació.

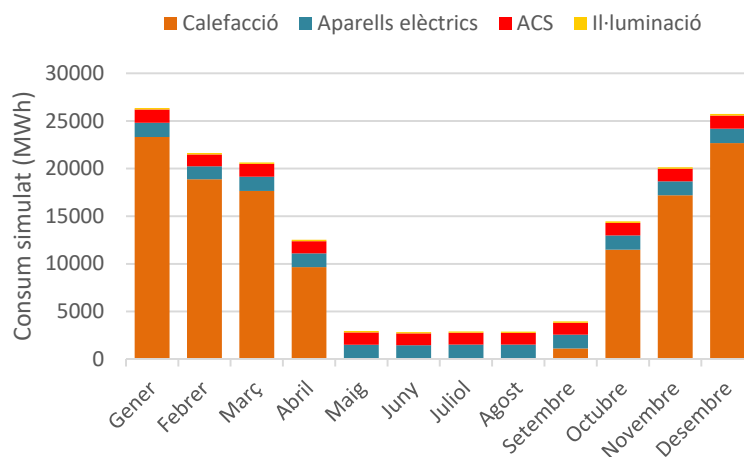


Figura 4.10. Consum d'energia mensual simulat en l'UBEM d'Escaldes-Engordany segon l'ús energètic

Font. Elaboració pròpia

La Figura 4.11 mostra els resultats mensuals de la simulació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany per cadascun dels arquetips. En aquesta s'aprecia que els arquetips que presenten major consum són els pertanyents a la categoria residencial plurifamiliar fuel (RMF), més concretament els arquetips RMF1_B2 i RMF1_D representant el 21% i el 19% del total, respectivament. Aquest fet es deu principalment a la gran quantitat de zones tèrmiques que componen aquests arquetips. D'altra banda, els arquetips que disposen de calefacció elèctrica, és a dir els pertanyents a la categoria RME i RSE, són els que presenten menors consums al ser minoritaris en la totalitat del parc edificat.

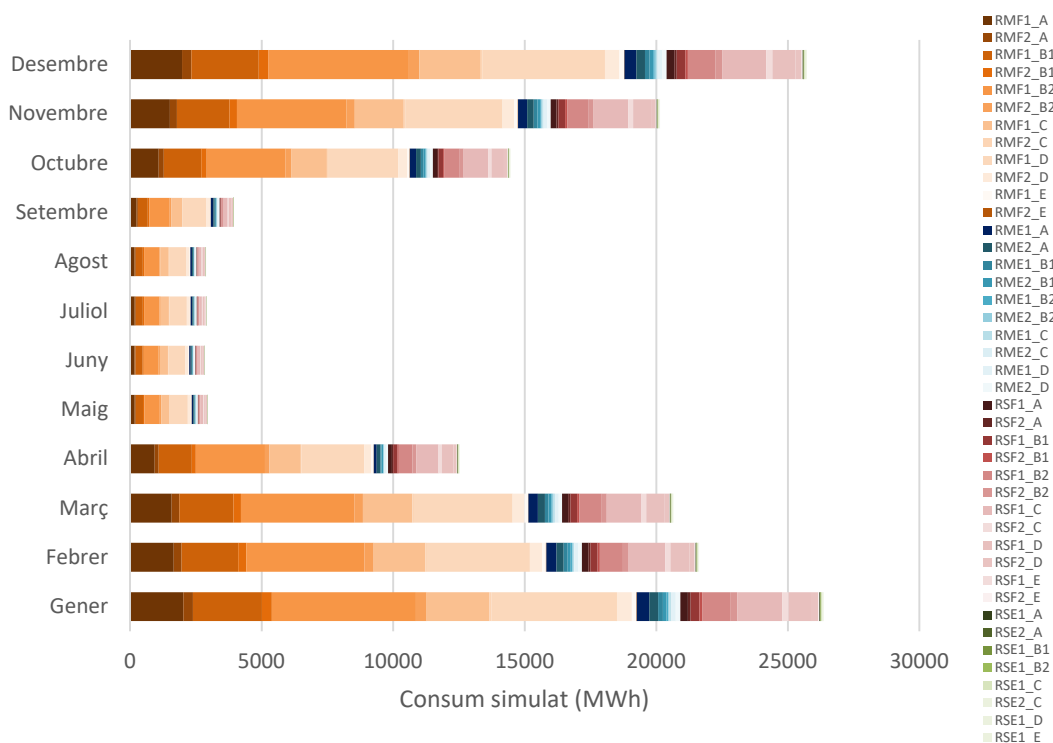


Figura 4.11. Consum anual per arquetip

Font. Elaboració pròpia

A l’analitzar el consum energètic dels arquetips per unitat de superfície, tal com mostra la Figura 4.12, s’aprecia que els arquetips que presenten majors consums són els pertanyents a la categoria RSF, més precisament els del període A, B1 i B2. Els arquetips plurifamiliars, és a dir els pertanyents a les categories RMF i RME, presenten consums per superfície molt similars, mentre que la categoria RSF és la que presenta uns consums més baixos. En els arquetips de tipus unifamiliar, s’aprecia clarament una disminució del consum entre el període constructiu A i E, sobretot en el consum de la calefacció. Per contra, en el cas dels arquetips de tipus plurifamiliar, és a dir els pertanyents a les categories RME i RSE, malgrat també presentar una disminució del consum, aquest és menys gradual.

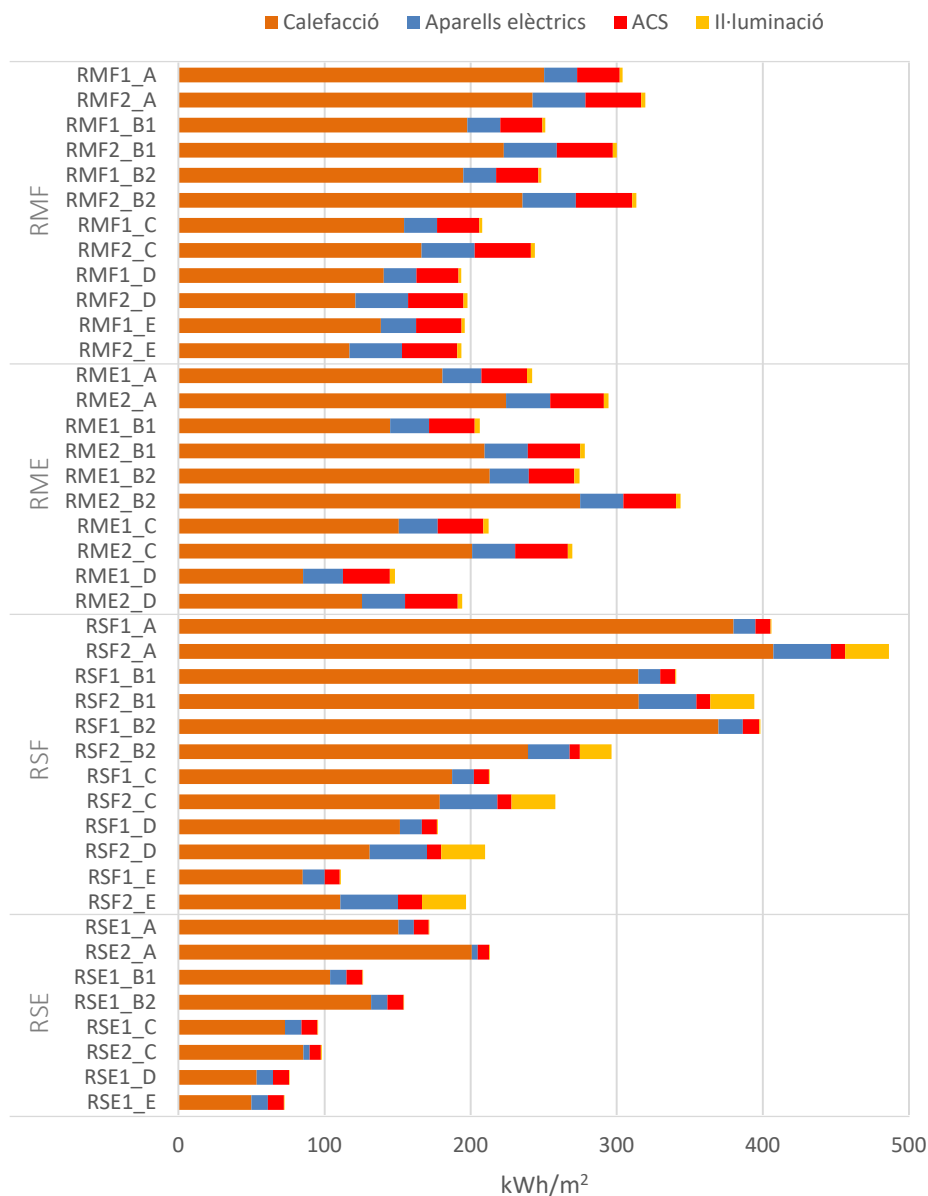


Figura 4.12. Consum anual per unitat de superfície simulat segons arquetip i ús energètic

Font. Elaboració pròpia

Referent a la tipologia, en la Figura 4.13 s'aprecia que els edificis plurifamiliars representen el major consum energètic del parc edificat amb aproximadament un 80% del consum total d'energia. Això és degut, en gran mesura, a l'important nombre d'edificis d'aquesta tipologia en el parc edificat.

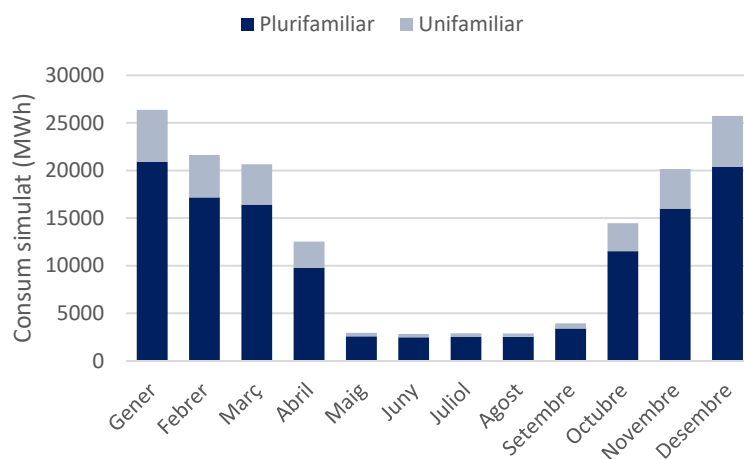


Figura 4.13. Consum d’energia mensual simulat en l’UBEM d’Escaldes-Engordany segons tipologia d’edifici

Font. Elaboració pròpia

Pel que fa al consum per períodes constructius, en la Figura 4.14 s’aprecia que els períodes B2 i D són els que representen la major part del consum amb un 27% del consum anual cadascun, seguits del període C amb un 17% i els períodes B1 i A amb un 14% i 13% respectivament. El període E és el que presenta menys consum corresponent l’1% del consum anual, no només per l’eficiència d’aquests sinó també perquè és el període actual i es compon de menys edificis.

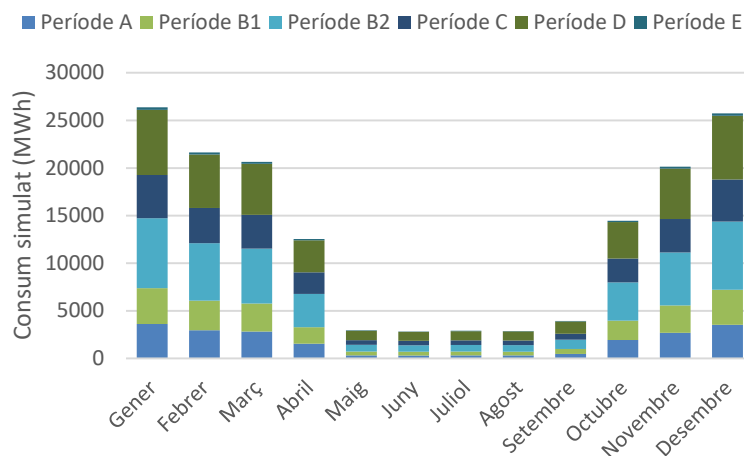


Figura 4.14. Consum d’energia mensual simulat en l’UBEM d’Escaldes-Engordany segons període constructiu

Font. Elaboració pròpia

Finalment, la Figura 4.15 i la Figura 4.16 mostren els consums anuals totals i per superfície resultants de l'UBEM agrupats per edifici. En la Figura 4.15 s'aprecia que els edificis que present major consums energètic es situen en el fons de vall compostat principalment per edificis plurifamiliars, mentre que en les urbanitzacions més allunyades, compostades principalment per edificis unifamiliars, el consum és menys important.

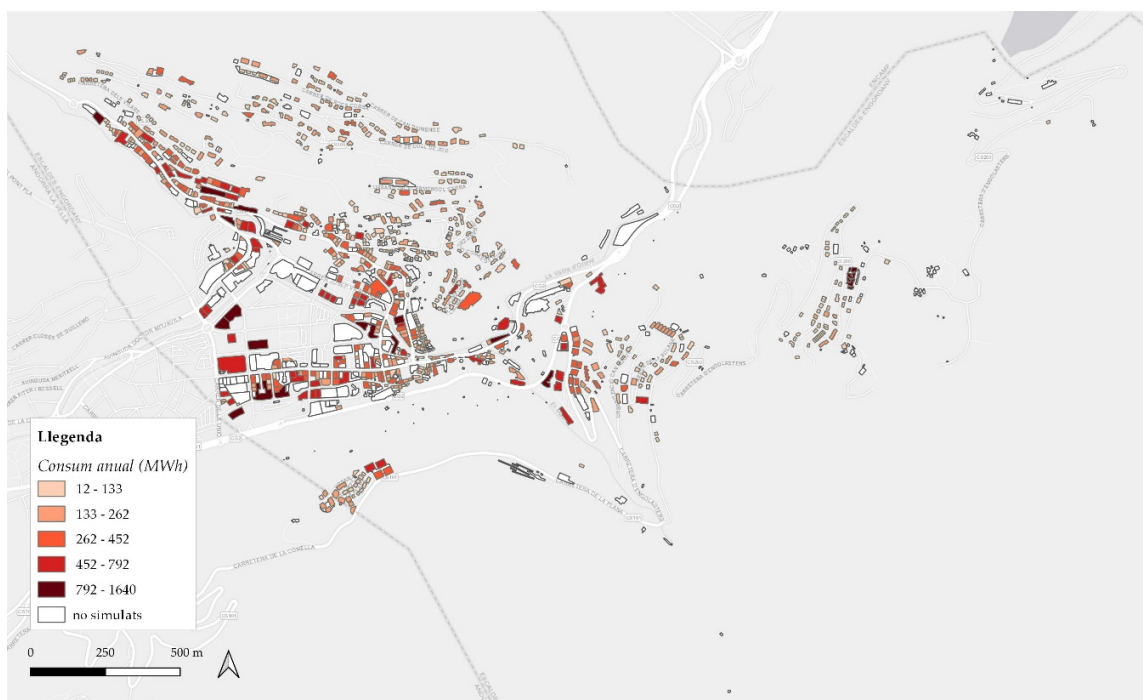


Figura 4.15. Cartografia del consum anual simulat a escala d'edifici

Font. Elaboració pròpia

Contràriament, en la Figura 4.16 s'aprecia que la tendència anterior s'inversa presentant majors consums per superfície els edificis unifamiliars situats en les urbanitzacions, mentre que els edificis plurifamiliars situats en el fons de vall presenten consums menys importants.

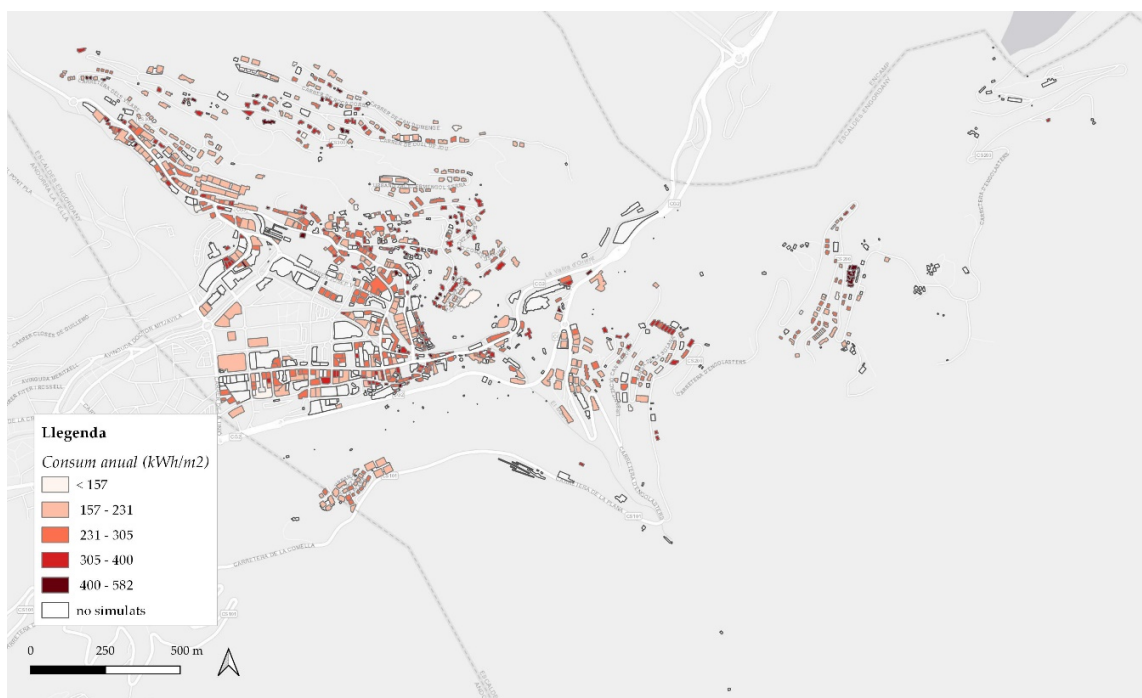


Figura 4.16. Cartografia del consum anual per superfície simulat a escala d'edifici

Font. Elaboració pròpia

Per tal de facilitar la consulta dels resultats obtinguts de l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ha implementat un visor interactiu^{4.12} (veure Figura 4.17). Aquest permet visualitzar els resultats de les simulacions a escala d'edifici. Inclou també opcions de filtratge en funció de variables del model com l'arquetip o el període constructiu, calcular estadístiques i crear gràfics tant per la totalitat del parc simulat com per grups d'edificis seleccionats per l'usuari.

Val a dir que aquesta eina s'ha posat a disposició del Comú d'Escaldes-Engordany per tal que pugui utilitzar-la per a les activitats de planificació energètica i urbanística de la parròquia.

^{4.12} Accés al visor: <https://arcg.is/n1HCC>



Figura 4.17. Eina de consulta dels resultats de les simulacions de l'UBEM d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

4.3 Bondat d'ajust de l'UBEM d'Escaldes-Engordany

En aquesta secció es presenta la bondat d'ajust dels resultats de l'UBEM d'Escaldes-Engordany utilitzant la nova metodologia de fragmentació definida en la present tesi. Prèviament es detalla el tractament realitzat als conjunts de dades d'ús d'energia tant mesurades com simulades, així com els identificadors utilitzats per avaluar l'ajust.

4.3.1 Tractament de les dades

Per poder determinar la bondat d'ajust dels resultats de l'UBEM s'han harmonitzat les dades d'ús d'energia, tant mesurades com simulades, per tal de que aquestes siguin comparables.

4.3.1.1 Dades d'ús d'energia mesurades

En la validació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'han utilitzat dos tipus de dades mesurades. D'una banda, els consums elèctrics mensuals del 2014 al 2017 dels comptadors d'ús residencial d'Escaldes-Engordany proporcionats per FEDA (Capítol 2 secció 2.2.1). D'altra banda, els consums anuals de calefacció amb fuel domèstic del 2018 al 2021 a escala d'habitatge de tres edificis facilitats per una gestoria d'immobles del país.

Al disposar de dades de diversos anys pels dos conjunts de dades mesurades, primerament s'han calculat la mitjana mensual, en el cas de les dades elèctriques, i la mitjana anual per les dades de fuel domèstic, descartant valors de consum nuls i negatius. En el cas de les dades d'ús d'electricitat, s'han descartat els valors de consum mensual inferiors a 70 kWh, llindar sota el qual s'ha considerat que la llar no està habitada en condicions d'habitabilitat convencionals.

Seguidament s'ha realitzat un procés de depuració de dades per descartar valors atípics, tant inferiors com superiors, de cadascun dels dos conjunts de dades mesurades evitant que puguin falsejar els resultats de la validació. Per al càlcul dels valors atípics, s'han normalitzat les dades de consum per la superfície dels seus corresponents habitatges i, en el cas de les dades dels consums elèctrics, s'han agrupat segons la tipologia d'habitatge (unifamiliar o plurifamiliar) i el tipus de font d'energia del sistema de calefacció (electricitat o fuel domèstic). D'aquesta manera s'evita identificar valors atípics deguts a les diferències de consum entre les agrupacions considerades. En el cas de les dades de consum de fuel domèstic aquesta diferenciació no ha estat necessària ja que aquestes tant sols s'han pogut obtenir per a edificis de la categoria RMF (Residencial Plurifamiliar Fuel).

Els valors atípics s'han determinat mitjançant el mètode interquartílic el qual considera com a valor atípic els que es trobin a una distància superior a 1,5 vegades el rang interquartílic (IQR de l'anglès *Interquartile Range*) del primer o tercer quartil com il·lustra la Figura 4.18.

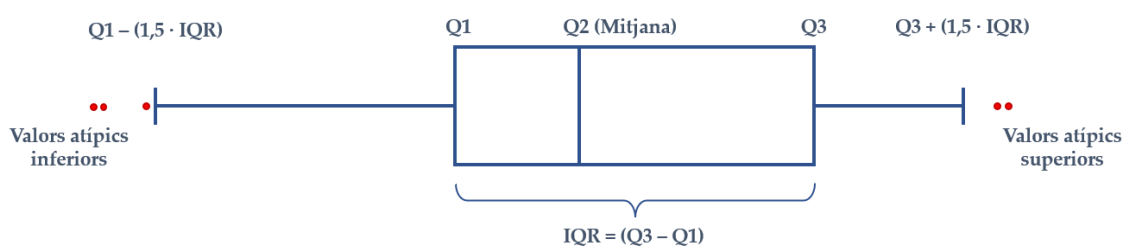


Figura 4.18. Càlcul dels valors atípics superiors mitjançant el mètode interquartílic

Font. Elaboració pròpia

Val a dir que, durant la combinació de les dades cadastrals i les dades de consum elèctric mesurades realitzada en la fase de caracterització, s'ha detectat la presència d'habitatges de tipus dúplex i tríplex en els edificis plurifamiliars. Aquest fet podria comportar problemes a l'hora de fer la validació ja que un valor de consum mesurat correspondria a dos o tres plantes simulades. Per evitar-ho, en la validació d'aquesta tipologia d'habitatges s'ha

utilitzat la superfície total de l'habitatge i la superfície per planta i s'ha determinat un coeficient d'ajust per assignar la part del consum corresponent a cada planta.

Per últim, per tal d'harmonitzar el nivell d'agregació de les dades de validació amb els resultats del model, en el cas dels edificis plurifamiliars s'han agrupat les dades d'ús d'energia mesurades per planta. Val a dir que, aquest nivell d'agregació de les dades comporta que les plantes que contenen algun valor de mesura atípic queden excloses del procés de validació.

4.3.1.2 Dades d'ús d'energia simulades

Tal com s'exposa en la secció 4.2.1 del present capítol, l'UBEM d'Escaldes-Engordany proporciona resultats d'ús d'energia mensuals de la il·luminació, els aparells elèctrics, l'ACS i la calefacció.

Val a dir que no tots els usos utilitzen la mateixa font d'energia motiu pel qual, per determinar la bondat d'ajust del model, s'han exclòs els usos energètics amb fonts d'energia diferent de la de les dades d'ús d'energia mesurades. En el cas de la validació dels consums elèctrics, els arquetips de les categories RME i RSE inclouen tots els usos resultants de la simulació (il·luminació, aparells elèctrics, ACS i calefacció), mentre que els arquetips de les categories RMF i RSF tant sols inclouen la il·luminació i els aparells elèctrics ja que la calefacció i l'ACS utilitzen fuel domèstic.

Per últim, en els edificis unifamiliars (arquetips de les categories RSE i RSF), s'han agrupat els resultats per planta obtinguts del model a escala d'edifici ja que els edificis unifamiliars consten d'un únic comptador per edifici.

4.3.2 Validació dels resultats

Un cop harmonitzades les dades d'ús d'energia mesurades i simulades s'ha determinat la bondat d'ajust dels resultats de la simulació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany per cadascuna de les fonts d'energia presents al parc d'edificis modelitzat.

4.3.2.1 Indicadors de bondat d'ajust

Generalment l'ajust dels UBEM s'avalua a través d'indicadors estadístics enfocats a estudiar-ne el biaix i la variabilitat (Oraipoulos & Howard, 2022). Amb aquest objectiu, per validar l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'utilitzen els següents indicadors:

- **Error (E)**

L'error es defineix com la diferència percentual entre els valors simulats i els observats (veure l'eq. 4.1).

$$E = \frac{S_i - M_i}{M_i} \times 100 \quad (4.1)$$

On:

M_i valors mesurats

S_i valors simulats

Val a dir que en el casos en el quals s'han analitzat els errors de més d'una zona tèrmica, s'ha determinat la mitjana dels errors.

- **MAPE**

L'error percentual absolut mitjà (MAPE, de l'anglès *mean absolute percentage error*) és la mitjana dels errors percentuals i es defineix com la suma del errors absoluts individuals dividit pels valors mesurats (veure l'eq. 4.2)

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{M_i - S_i}{M_i} \right| \quad (4.2)$$

On:

n número d'observacions

M_i valor mesurat

S_i valor simulat

- **CV_{RMSE}**

El coeficient de variació de l'error quadràtic mitjà (CV_{RMSE}), de l'anglès *coefficient of variation of the root-mean-square-error*, es defineix com l'arrel quadrada de l'error quadràtic mitjà dividit per la mitjana dels valors mesurats (veure l'eq. 4.3).

$$CV_{RMSE} = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^n |e_i|^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}}{\mu_O} \times 100 \quad (4.3)$$

On:

n número d'observacions

e_i diferència entre valors simulats i mesurats

μ_O mitjana dels valors mesurats

4.3.2.2 Validació dels resultats de consum d'electricitat

La resolució espacial i temporal en la qual es realitza la validació és determinant en els resultats obtinguts. Per aquest motiu, la bondat d'ajust de l'ús d'electricitat de l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ha estudiat a diferents nivells d'agregació dels edificis així com a diferents resolucions temporals.

Inicialment es presenten els resultats de la validació a diferents resolucions espacials (parc edificat, edifici i planta), a resolució temporal anual i mensual. Seguidament es presenten els resultats a escala d'arquetip agrupats en: (1) RMF, (2) RME, (3) RSF i (4) RSE, a tres resolucions temporals: (1) anual, (2) període d'hivern que comprèn els mesos de novembre, desembre, gener i febrer, i (3) període anomenat d'estiu format pels mesos de maig i juny. Val a dir que, per evitar mesos amb una baixa ocupació dels habitatges degut a les vacances, no s'ha inclòs el juliol i l'agost dins del període d'estiu. A més també s'exclouen els mesos de setembre i abril considerats com mesos de transició del sistema de calefacció (Capítol 2 Taula 2.11), en els quals segons les dades extretes de les enquestes el sistema no està en ús en tots els habitatges enquestats.

Les tres resolucions temporals considerades s'han definit amb l'objectiu d'avaluar la bondat d'ajust de l'UBEM al llarg de l'any i poder així deduir quin dels usos simulats presenta majors desajustos.

La limitació en la disponibilitat de dades mesurades de les diferents fonts d'energia utilitzades als habitatges fa que la validació completa de l'ús d'energia pugui realitzar-se únicament pels arquetips RME i RSE, on la totalitat de l'energia utilitzada és elèctrica.

- **Validació general del parc edificat**

La simulació dels consums elèctrics del parc edificat agregats a escala anual presenta un error del 5,6% respecte a les dades d'ús d'energia mesurades (veure Figura 4.19). Tanmateix, l'anàlisi a escala mensual revela que l'UBEM sobreestima el consum del parc edificat en alguns mesos i el subestima en d'altres. Tal com es presenta en la Taula 4.3, l'error màxim i mínim es donen als mesos de desembre i setembre amb un 26% i 0,3%, respectivament.

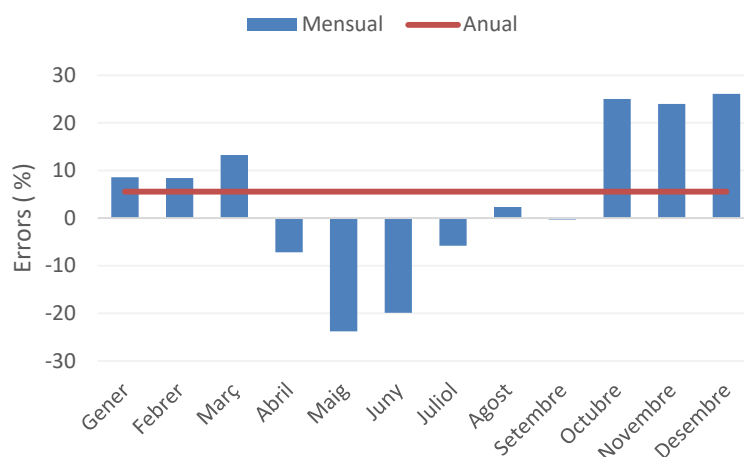


Figura 4.19. Error de l'UBEM d'Escaldes-Engordany a escala de parc edificat. Escala temporal anual (en vermell) i mensual (en blau)

Font. Elaboració pròpia

A l'analitzar els errors de l'UBEM a resolucions espacials més desagregades, com a escala d'edifici o de planta, s'observa que aquests s'accentuen (veure Figura 4.20). El rang d'errors és molt ampli amb valors màxims positius de 3 822% a escala d'edifici i 5 456% a escala de planta, i uns màxims negatius de 91% per ambdues escales. Pel que fa als errors mínims aquests són inexistent (0,05%) a escala d'edifici com de planta el que demostra la bona predicció de l'UBEM generat en alguns casos. Tot i aquests valors màxims tant elevats, val a dir que, més del 60% dels errors per ambdós casos es situen per sota del 50%, ja sigui negatiu o positiu, assenyalat en la Figura 4.20 per una franja vermella. Els valors màxims positius, molt més elevats, poden ser deguts a una mala classificació en l'anàlisi LDA realitzat per estimar la font energètica utilitzada per la calefacció (Capítol 2 secció 2.2.4.1).

Els valors d'error obtinguts són majoritàriament negatius, 67% dels errors de les zones tèrmiques a escala d'edifici i 60% a escala de planta, el que indica la presència d'un biaix negatiu en tots els mesos, i per tant, que l'UBEM d'Escaldes-Engordany infraestima els consums reals quan s'analitza a escala d'edifici o de planta.

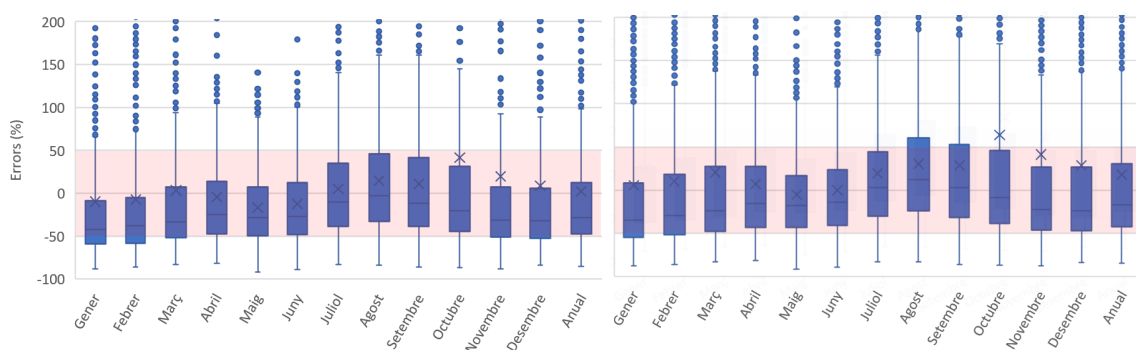


Figura 4.20. Errors anuals i mensuals a escala d'edifici (esquerra) i de planta (dreta)

Font. Elaboració pròpia

La Taula 4.3 presenta els valors dels indicadors de bondat d'ajust calculats. S'aprecia que l'indicador MAPE augmenta segons es va desagregant el parc amb un augment més significatiu al passar de l'escala de parc edificat a l'escala d'edifici, contràriament a l'indicador CV_{RMSE} que disminueix a excepció dels mesos de maig a setembre.

	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre	Annual
Parc edificat													
E	8,6	8,4	13,3	-7,2	-23,8	-19,9	-5,8	2,3	-0,3	25,0	24,0	26,1	5,6
MAPE	8,57	8,4	13,3	7,2	23,8	19,9	5,8	2,3	0,3	25,0	24,0	26,1	5,6
CV_{RMSE}	8,57	8,4	13,3	7,2	23,8	19,9	5,8	2,3	0,3	25,0	24,0	26,1	5,6
Resolució edifici													
Error	-9,9	-7,2	3,2	-4,3	-16,8	-12,4	4,9	14,7	10,8	41,3	19,6	8,9	2,1
MAPE	65,2	63,3	65,5	49,2	41,2	41,7	46,3	51,1	53,5	89,5	79,7	70,5	57,5
CV_{RMSE}	175,1	164,7	166,0	75,5	57,1	57,1	56,4	60,1	70,9	176,8	202,2	211,4	122,3
Resolució planta													
Error	5,8	9,9	20,5	7,1	-5,1	-0,3	18,2	30,5	28,5	64,1	41,3	28,6	18,1
MAPE	70,2	68,9	72,9	51,5	41,7	42,8	50,4	56,9	60,6	103,5	92,1	80,5	63,3
CV_{RMSE}	146,7	139,6	139,4	74,6	67,1	65,2	63,2	66,1	72,0	148,4	167,1	174,2	105,3

*E, MAPE i CV_{RMSE} en %

Taula 4.3. Valors dels indicadors de bondat d'ajust mensuals i anuals segons l'agrupació espacial de les zones tèrmiques

Font. Elaboració pròpia

- **Validació a escala d'arquetips**

Categoria RMF – Residencial plurifamiliar fuel

La validació del consum energètic elèctric dels arquetips pertanyents a la categoria RMF inclouen els usos energètics de la il·luminació i els parells elèctrics, utilitzant fuel domèstic per la calefacció i l'ACS. Els errors d'aquests es mostren en la Figura 4.21 per cadascuna de les tres resolucions temporals detallades anteriorment. En aquesta s'aprecia que el rang de valors d'error és inferior que en la validació a escala d'edifici, amb un error màxim de 669% positiu per l'arquetip RMF1_D i un error màxim negatiu de 79% per l'arquetip RMF1_B2. Pel que fa a l'error mínim es detecten valors molt propers a 0 indicant que l'UBEM generat s'ajusta a la realitat energètica en alguns casos. Més concretament, el 72% de les zones tèrmiques pertanyents a la categoria RMF presenten errors inferiors al 10% i el 89% presenten errors inferiors al 50% independentment del període analitzat. A més, la majoria de zones tèrmiques que componen els arquetips, concretament el 65%, presenten errors negatius el que indica que l'UBEM té un biaix negatiu en l'estimació del consum del parc edificat per la majoria de zones tèrmiques exceptuant els arquetips RMF1_D i RMF1_E.

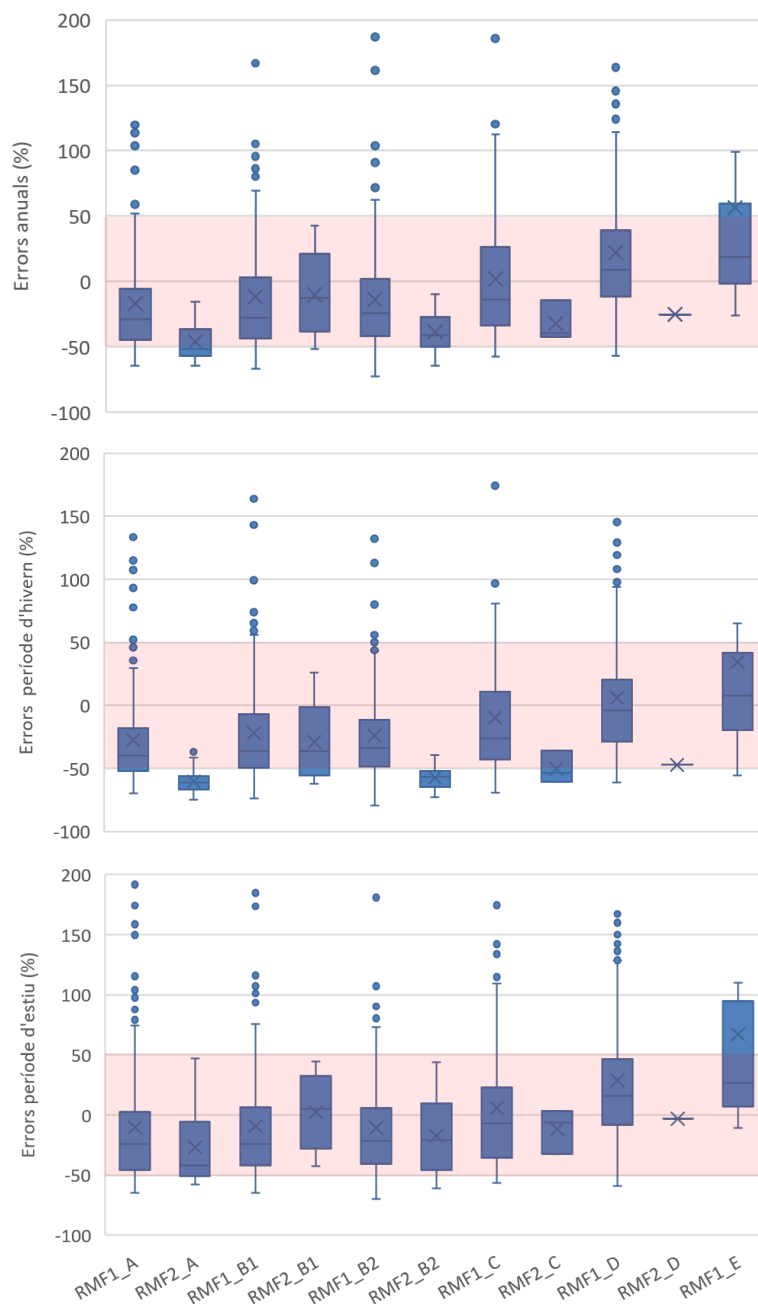


Figura 4.21. Errors anuals, del període d'hivern i d'estiu per a la tipologia RMF

Font. Elaboració pròpia

Els valors dels indicadors de bondat d'ajust de les zones tèrmiques de la categoria RMF es mostren en la Taula 4.4. Aquests mostren que l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ajusta millor durant el període d'estiu que el d'hivern, a excepció dels clústers RMF1_D i RMF1_E.

A més, val a dir que de les zones tèrmiques simulades, el 47% han quedat excloses a causa de la presència de valors atípics.

	RMF1_A	RMF2_A	RMF1_B1	RME2_B1	RMF1_B2	RME2_B2	RMF1_C	RMF2_C	RMF1_D	RMF2_D	RMF1_E	RME2_E
Recompte d'unitats												
Totals	211	43	304	49	476	46	242	12	426	22	21	2
Validades	143	18	182	9	245	17	138	3	214	1	11	0
Anual												
E	-16,7	-45,9	-11,7	-10,2	-13,8	-38,4	2,0	-31,9	21,9	-25,2	56,5	-
MAPE	37,3	45,9	39,2	29,2	34,3	38,4	38,1	31,9	40,1	25,2	66,0	-
CV_{RMSE}	54,8	61,6	56,3	46,2	33,7	50,9	44,5	39,5	46,0	25,2	56,0	-
Període d'hivern												
E	-27,3	-60,3	-21,7	-29,1	-23,9	-57,2	-9,9	-50,0	6,1	-47,0	34,3	-
MAPE	41,6	60,3	41,7	40,7	38,1	57,2	39,1	50,0	36,7	47,0	58,4	-
CV_{RMSE}	60,6	68,3	63,7	46,4	53,0	64,2	51,3	55,4	47,0	47,0	53,9	-
Període d'estiu												
E	-10,5	-27,0	-9,4	2,22	-10,8	-17,7	5,7	-11,8	28,4	-3,3	67,2	-
MAPE	38,3	37,5	39,4	27,61	35,2	31,4	38,6	14,0	44,2	3,3	69,1	-
CV_{RMSE}	57,1	66,1	55,7	27,31	47,0	47,4	45,5	32,6	50,1	3,3	65,9	-

*E, MAPE i CV_{RMSE} en %

Taula 4.4. Valors dels indicadors de bondat d'ajust pels arquetips de tipus RMF segons la resolució temporal

Font. Elaboració pròpia

Categoria RME – Residencial plurifamiliar elèctric

La validació del consum energètic elèctric dels arquetips pertanyents a la categoria RME inclouen els usos energètics de la il·luminació, els aparells elèctrics, la calefacció i l'ACS. El rang d'errors de les zones tèrmiques dels arquetips de la categoria RME mostrats en la Figura 4.22 són superiors als de la categoria RMF sobretot durant el període d'hivern amb un error màxim superior de 2246% en l'arquetip RME1_A, mentre que durant l'estiu aquest és del 542% per l'arquetip RME2_B1. Contràriament als arquetips de la categoria RMF, la majoria de les zones tèrmiques que componen els arquetips, concretament el 96%, presenten valors d'error positius en el període d'hivern, contra un 43% durant el període d'estiu. Aquest biaix positiu dels errors apunta a que l'estimació del consum de calefacció és la principal responsable dels errors de l'arquetip RME.

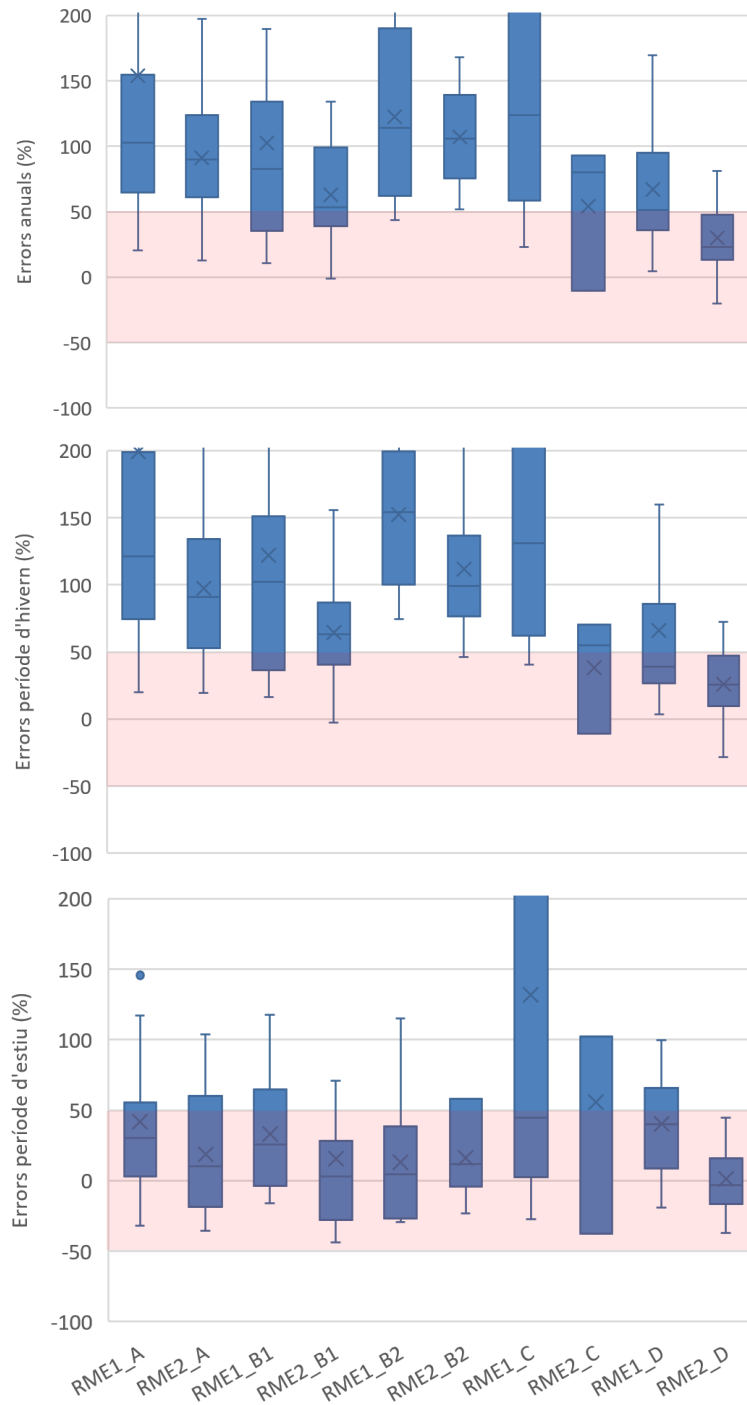


Figura 4.22. Errors anuals, del període d'hivern i d'estiu per a la tipologia d'edificis RME

Font. Elaboració pròpia

En la mateixa línia, els indicadors de bondat d'ajust dels arquetips de la categoria RME mostrats en la Taula 4.5 presenten valors més petits per al període d'estiu que pel període d'hivern el que reforça la hipòtesi d'estar sobreestimant la demanda de calefacció en la modelització. Val a dir que de les zones tèrmiques simulades, el 32% queden descartades per contenir valors atípics, percentatge inferior al de la categoria RMF.

	RME1_A	RME2_A	RME1_B1	RME2_B1	RME1_B2	RME2_B2	RME1_C	RME2_C	RME1_D	RME2_D
Recompte d'unitats										
Totals	62	38	35	28	12	14	10	3	21	24
Validades	44	21	24	25	8	11	5	3	13	14
Anual										
E	154,1	91,1	102,6	63,1	122,6	107,2	321,9	54,2	66,9	29,8
MAPE	154,1	91,1	102,6	63,2	122,6	107,2	321,9	61,2	66,9	33,0
CV_{RMSE}	139,2	79,6	73,6	64,6	107,4	111,8	172,8	55,5	58,2	49,3
Període d'hivern										
E	198,9	97,3	122,1	64,5	152,3	111,8	431,1	38,2	65,8	26,0
MAPE	198,9	97,3	122,1	64,7	152,3	111,8	431,1	45,5	65,8	32,4
CV_{RMSE}	160,3	91,0	89,5	66,9	141,2	126,3	180,0	45,0	50,6	47,9
Període d'estiu										
E	41,7	18,7	32,9	15,6	12,9	15,9	131,8	55,8	40,5	1,3
MAPE	46,7	36,6	39,1	39,1	33,4	25,4	142,6	80,8	46,2	18,6
CV_{RMSE}	47,2	32,3	31,2	29,5	30,9	26,6	93,0	61,3	36,6	19,2

*E, MAPE i CV_{RMSE} en %

Taula 4.5. Valors dels indicadors de bondat d'ajust pels arquetips de tipus RME segons l'escala temporal

Font. Elaboració pròpia

Categoria RSF – Residencial unifamiliar fuel

La validació del consum energètic elèctric dels arquetips pertanyents a la categoria RSF inclouen els usos energètics de la il·luminació i els parells elèctrics ja que utilitzen fuel domèstic per a la calefacció i l'ACS. En el cas dels arquetips de la categoria RSF mostrats en la Figura 4.23 s'aprecia que el rang de valors d'error és molt reduït, en comparació amb les categories RMF o RME, degut en gran part al fet que aquesta categoria es compona d'una quantitat de zones tèrmiques molt inferior. El valor d'error màxim positiu és del 174% detectat per l'arquetip RSF1_B1, valor molt inferior als errors màxims detectats en les categories RMF o RME, i l'error màxim negatiu és del 87%, detectat per l'arquetip RSF1_D. El 98% dels errors es situen per sota del 50% independentment del període, i igual que en la

categoria RMF, els valors d'errors són principalment negatius, més concretament el 89%. Presenten un biaix negatiu, infraestimant el consum real del parc per la majoria de zones tèrmiques, i de manera més accentuada durant el període d'hivern.

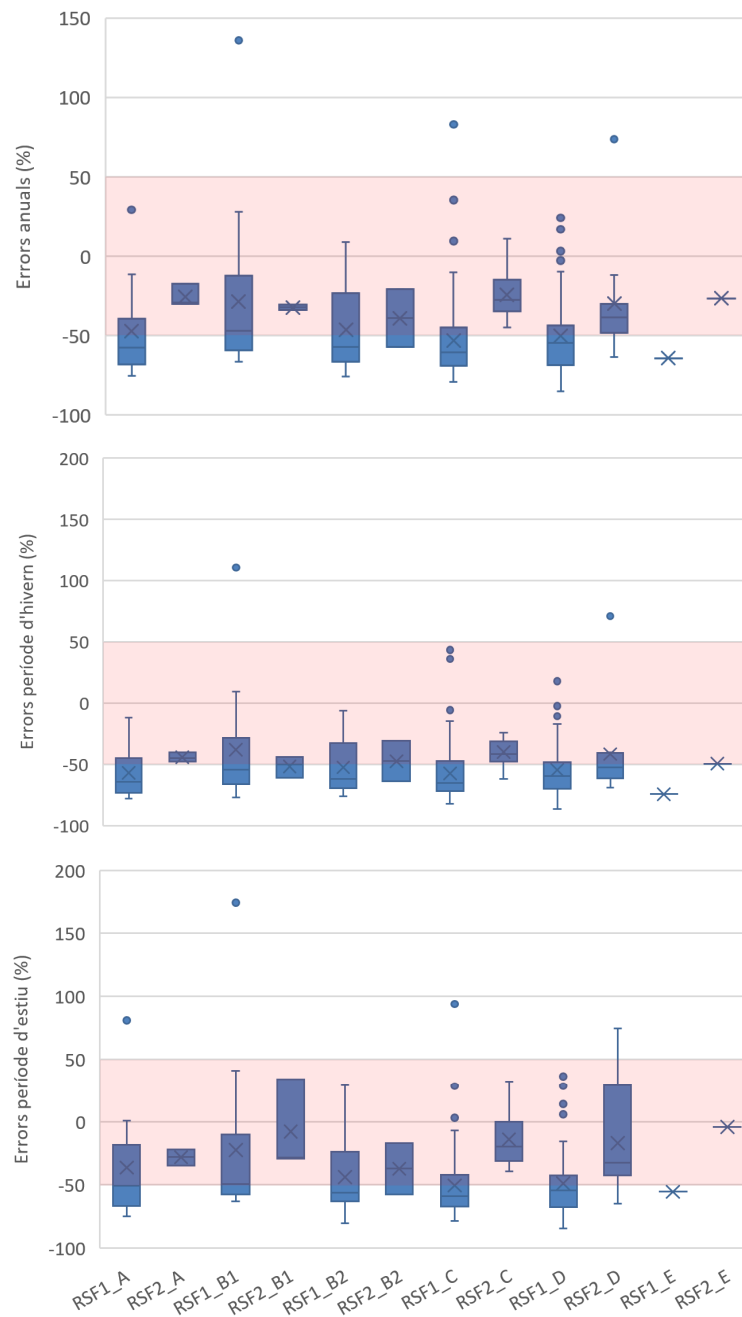


Figura 4.23. Errors anuals, del període d'hivern i d'estiu per a la tipologia d'edificis RSF

Font. Elaboració pròpia

Els indicadors de bondat d’ajust mostrats en la Taula 4.6 mostren que l’UBEM d’Escaldes-Engordany presenta millor comportament pel període d’estiu que pel d’hivern en la totalitat dels arquetips de tipus RSF. A més, s’aprecia que la quantitat de zones tèrmiques descartades per contenir valors atípics és molt inferior a la de les categories RMF i RME amb un 23% de zones tèrmiques descartades.

	RSF1_A	RSF2_A	RSF1_B1	RSF2_B1	RSF1_B2	RSF2_B2	RSF1_C	RSF2_C	RSF1_D	RSF2_D	RSF1_E	RSF2_E
Recompte d’unitats												
Totals	18	7	21	6	32	8	102	16	67	16	1	2
Validades	12	3	15	3	24	2	84	14	57	11	1	1
Anual												
E	-47,1	-25,4	-28,6	-32,2	-46,4	-39,1	-53,0	-24,3	-50,2	-29,9	-64,2	-26,6
MAPE	52,0	25,5	50,5	32,2	47,3	39,1	56,1	25,9	52,0	43,3	64,2	26,6
CV_{RMSE}	65,4	30,7	59,5	33,4	70,9	52,9	87,7	39,8	77,4	68,9	64,2	26,6
Període d’hivern												
E	-57,1	-44,2	-38,3	-51,8	-52,5	-47,4	-57,6	-40,2	-54,7	-41,6	-74,4	-49,5
MAPE	57,1	44,2	54,3	51,8	52,5	47,4	59,5	40,2	55,2	54,5	74,4	49,5
CV_{RMSE}	71,7	45,1	69,3	64,9	75,3	60,7	93,2	49,0	80,7	71,0	74,4	49,5
Període d’estiu												
E	-36,3	-28,2	-22,6	-8,0	-43,9	-37,3	-50,6	-14,1	-49,0	-16,9	-55,4	-4,2
MAPE	49,9	28,2	51,2	30,6	47,7	37,3	54,3	24,1	52,6	41,5	55,4	4,2
CV_{RMSE}	67,5	31,7	57,1	30,9	72,7	53,8	88,6	39,6	78,5	76,6	55,4	-4,2

*E, MAPE i CV_{RMSE} en %

Taula 4.6. Valors dels indicadors de bondat d’ajust pels arquetips de tipus RSF segons la resolució temporal

Font. Elaboració pròpia

Categoria RSE – Residencial unifamiliar elèctric

La validació del consum energètic elèctric dels arquetips pertanyents a la categoria RSE inclou els usos energètics en il·luminació, aparells elèctrics, calefacció i ACS. Els errors dels arquetips pertanyents a la categoria RSE es mostren en la Figura 4.24. Igual que en la categoria RSF, s’aprecia que el rang de valors d’errors és més reduït que per les categories RMF i RME, possiblement degut a que aquesta categoria compta amb menys zones tèrmiques com també s’ha comentat per la categoria RSF. El valor d’error màxim positiu així com negatiu és del 90%. La totalitat dels valors d’error són negatius en el període d’estiu, mentre que durant l’hivern el 40% dels errors són positius, el que significa que l’UBEM està

sobreestimant el consum real del parc. Val a dir que, en aquesta categoria, es disposen de molt poques zones tèrmiques el que pot portar a resultats poc representatius.

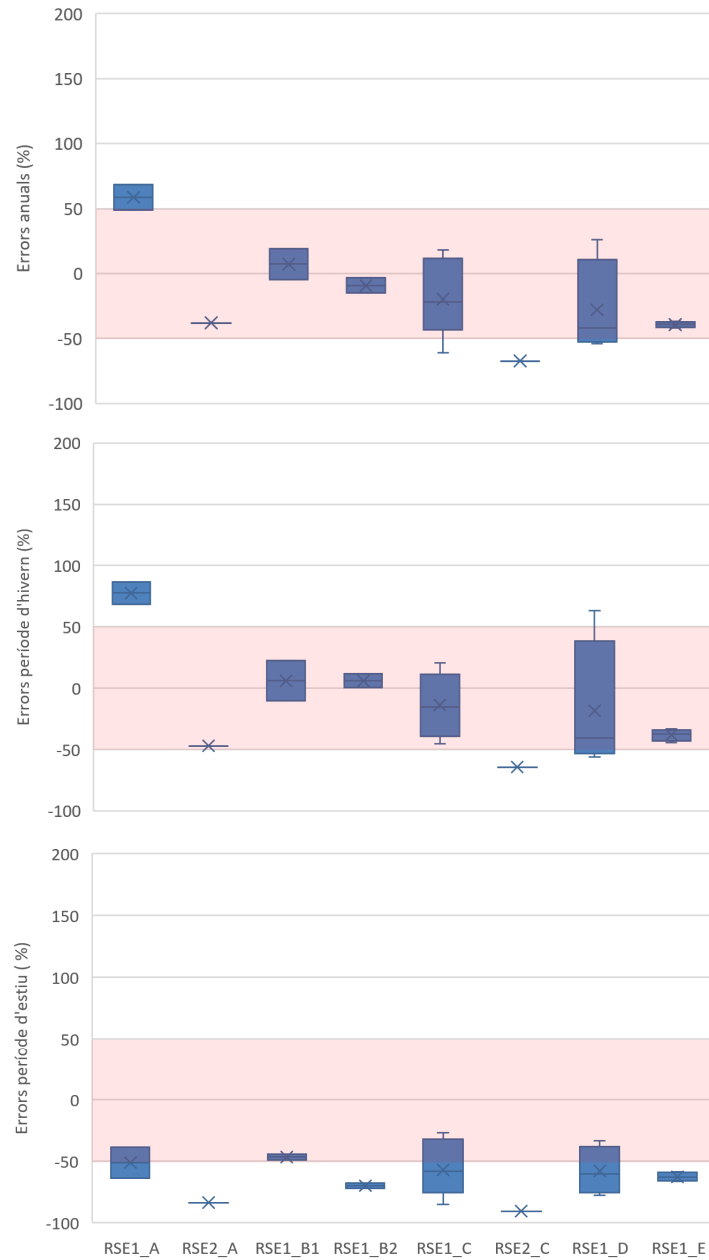


Figura 4.24. Errors anuals, pel període d'hivern i estiu per a la tipologia d'edificis RME

Font. Elaboració pròpia

Pel que fa als valors dels indicadors de bondat d'ajust mostrats en la Taula 4.7, en línia amb l'observat en la resta d'arquetips s'aprecia que l'UBEM d'Escaldes-Engordany presenta millors valors durant el període d'estiu que pel d'hivern en la totalitat dels arquetips de tipus RSE. Pel que fa a les zones tèrmiques excloses per contenir valors atípics, aquesta és la categoria en la qual s'han preservat el major nombre de zones tèrmiques amb un 93%.

	RSE1_A	RSE2_A	RSE1_B1	RSE1_B2	RSE1_C	RSE2_C	RSE1_D	RSE1_E
Recompte d'unitats								
Totals	4	1	3	2	9	1	5	4
Validades	2	1	2	2	9	1	4	4
Anual								
E	58,6	-38,1	7,3	-9,2	-19,7	-67,3	-28,0	-39,4
MAPE	58,6	38,1	11,8	9,2	29,0	67,3	40,9	39,4
CV _{RMSE}	70,8	38,1	6,5	8,9	55,8	67,3	58,4	43,0
Hivern								
E	77,6	-47,0	6,1	6,0	-13,7	-64,40	-18,4	-38,1
MAPE	77,6	47,0	16,3	6,0	23,4	64,40	50,1	38,1
CV _{RMSE}	78,7	47,0	13,3	10,0	38,7	64,40	63,1	44,6
Estiu								
E	-51,1	-83,7	-46,5	-69,8	-57,1	-90,60	-58,0	-62,5
MAPE	51,1	83,7	46,5	69,8	57,1	90,60	58,0	62,5
CV _{RMSE}	48,0	83,7	61,5	70,2	73,2	90,60	76,6	63,5

*E, MAPE i CV_{RMSE} en %

Taula 4.7. Valors dels indicadors de bondat d'ajust pels arquetips de tipus RSE segons la resolució temporal

Font. Elaboració pròpia

4.3.2.3 Validació dels consums de fuel domèstic

La Figura 4.25 presenta els errors per cadascun dels tres edificis pels quals s'ha disposat de dades de consum de fuel domèstic destinat a la calefacció. En aquesta s'aprecia que l'UBEM sobreestima el consum real de calefacció en els tres casos, tot i que l'edifici B i C s'ajusten més als valors mesurats. Val a dir que, bona part de les plantes que componen els tres edificis s'han descartat per la presència de valors atípics.

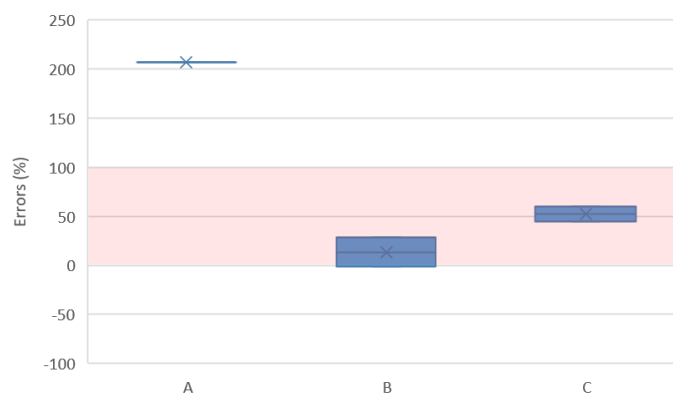


Figura 4.25. Errors anuals en els tres edificis analitzats

Font. Elaboració pròpia

Els edificis B i C pertanyen al període constructiu E i es situen en zones de nivell econòmic alt, mentre que l'edifici A, el que presenta major error, pertany al període constructiu B.2 i es situa en una zona d'Escaldes-Engordany on generalment hi viu gent amb menys poder adquisitiu. En aquest sentit, es planteja la hipòtesi que l'alt l'error en la simulació de l'edifici A pugui estar, en part, influenciada per aspectes de caire social com la pobresa energètica.

4.4 Referències

- Caputo, P., Costa, G., & Ferrari, S. (2013). A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Energy Policy*, 55, 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.006>
- Cerezo Davila, C., Reinhart, C. F., & Bemis, J. L. (2016). Modeling Boston: A workflow for the efficient generation and maintenance of urban building energy models from existing geospatial datasets. *Energy*, 117, 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.057>
- Chen, Y., Hong, T., & Piette, M. A. (2017). City-scale building retrofit analysis: A case study using CityBES. *Building Simulation Conference Proceedings*, 1, 369–376. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.071>
- COAA, & SaAs. (2012). *Quantificació del potencial d'eficiència energètica en el sector de l'edificació a Andorra (informe no públic)*.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus:

- Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Dall’O, G., Galante, A., & Torri, M. (2012). A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy & Buildings*, 48, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.034>
- Ferrando, M., Causone, F., Hong, T., & Chen, Y. (2020). Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities and Society*, 62(July), 102408. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408>
- Filogamo, L., Peri, G., Rizzo, G., & Giaccone, A. (2014). On the classification of large residential buildings stocks by sample typologies for energy planning purposes. *Applied Energy*, 135, 825–835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.002>
- Fonseca, J. A., Nguyen, T. A., Schlueter, A., & Marechal, F. (2016). City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy and Buildings*, 113, 202–226. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.055>
- Heiple, S., & Sailor, D. J. (2008). Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles. *Energy and Buildings*, 40(8), 1426–1436. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.01.005>
- Kontar, R. El, Polly, B., Charan, T., Katherine Fleming, Moore, N., Long, N., & Goldwasser, D. (2020). URBANopt: An Open-source Software Development Kit for Community and Urban District Energy Modeling. *2020 Building Performance Analysis Conference and SimBuild, October*, 293–301. <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76781.pdf>
- Kristensen, M. H., Choudhary, R., Pedersen, R. H., & Petersen, S. (2017). Bayesian calibration of residential building clusters using a single geometric building representation. *Building Simulation Conference Proceedings*, 4(August), 2251–2260. <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.330>
- Kristensen, M. H., Hedegaard, R. E., & Petersen, S. (2018). Hierarchical calibration of archetypes for urban building energy modeling. *Energy and Buildings*, 175, 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.030>
- Lorimer, S. (2012). A housing stock model of non-heating end-use energy in England verified by aggregate energy use data. *Energy Policy*, 50, 419–427. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.037>
- Malhotra, A., Bischof, J., Nichersu, A., Häfele, K. H., Exenberger, J., Sood, D., Allan, J., Frisch, J., van Treeck, C., O’Donnell, J., & Schweiger, G. (2022). Information modelling for

- urban building energy simulation—A taxonomic review. *Building and Environment*, 208(October 2021), 108552. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108552>
- Monteiro, C. S., Costa, C., Pina, A., Santos, M. Y., & Ferrão, P. (2018). An urban building database (UBD) supporting a smart city information system. *Energy and Buildings*, 158, 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.009>
- Naber, E., Volk, R., & Schultmann, F. (2017). From the Building Level Energy Performance Assessment to the National Level: How are Uncertainties Handled in Building Stock Models. *Procedia Engineering*, 180, 1443–1452. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.307>
- Oraïopoulos, A., & Howard, B. (2022). On the accuracy of Urban Building Energy Modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158(March 2021), 111976. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111976>
- Quan, S. J., Li, Q., Augenbroe, G., & Brown. (2015). Urban Data and Building Energy Modeling: A GIS-Based Urban Building Energy Modeling System Using the Urban-EPC Engine. *Planning Support Systems and Smart Cities*, 213(September). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18368-8>
- Reinhart, C. F., & Cerezo Davila, C. (2016). Urban building energy modeling - A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- Schmitt, G., Tapias, E., & Wisniewska, M. H. (2019). *City in your ahnds*. Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETHZ).
- Shimoda, Y., Fujii, T., Morikawa, T., & Mizuno, M. (2004). Residential end-use energy simulation at city scale. *Building and Environment*, 39(8 SPEC. ISS.), 959–967. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.020>
- Sokol, J., Cerezo Davila, C., & Reinhart, C. F. (2017). Validation of a Bayesian-based method for defining residential archetypes in urban building energy models. *Energy and Buildings*, 134, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.050>
- Sun, K., Hong, T., Taylor-Lange, S. C., & Piette, M. A. (2016). A pattern-based automated approach to building energy model calibration. *Applied Energy*, 165, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.026>
- Traveset-Baro, O. (2017). *Prospectiva energètica al Principat d’Andorra: model integrat d’avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista* [Universitat Politècnica de Catalunya]. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <http://www.tdx.cat/handle/10803/460913>

5 VALIDACIÓ DE LA METODOLOGIA HÍBRIDA

Per valorar la idoneïtat de la nova metodologia de fragmentació definida en la present tesi s'ha generat un segon UBEM d'Escaldes-Engordany implementat mitjançant una fragmentació determinista. Aquest capítol exposa inicialment la caracterització i generació realitzada per implementar l'UBEM a partir d'una fragmentació determinista, i seguidament es comparen els resultats de la bondat d'ajust d'aquest UBEM amb els presentats en el Capítol 4 amb l'objectiu de determinar si la nova metodologia proposada en la present tesi aporta una millora respecte els mètodes tradicionals.

Per tal de diferenciar els dos UBEM implementats, s'anomena UBEM-híbrid a l'implementat a partir de la nova metodologia de fragmentació presentada i UBEM-determinista a l'implementat mitjançant la fragmentació determinista.

5.1 Caracterització i generació de l'UBEM-determinista

En la caracterització de l'UBEM-determinista s'han utilitzat les mateixes dades geomètriques així com el mateix fitxer climàtic que per l'UBEM-híbrid. Les úniques diferències entre els dos UBEM són les propietats no-geomètriques, i principalment la fragmentació del parc edificat.

La fragmentació realitzada en l'UBEM-determinista consisteix en la tradicional fragmentació determinista (Capítol 2 secció 2.1.3.1) en la qual el parc edificat residencial d'Escaldes-Engordany s'ha dividit en base a la categoria (plurifamiliar - unifamiliar), així com als períodes constructius tal com mostra la Taula 5.1.

Classificació per tipologies	Classificació per períodes constructius				
	Període A Pre-1955	Període B 1955-1980	Període C 1981-1995	Període D 1996-2010	Període E Post-2010
Plurifamiliar 5833 uc	717 uc	2434 uc	743 uc	1891 uc	48 uc
Unifamiliar 447 uc	30 uc	107 uc	186 uc	117 uc	7 uc

uc: unitat cadastral

Taula 5.1. Arquetips obtinguts mitjançant la fragmentació determinista del parc edificat residencial d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

Pel que fa a la definició de les propietats no-geomètriques, s'ha seguit el mateix procediment que en l'UBEM-híbrid (Capítol 2 secció 2.3.3). En el cas de les propietats relacionades amb els aspectes arquitectònics s'han utilitzat les mateixes dades ja que els períodes constructius són equivalents (Capítol 2 secció 2.3.3.2). Les propietats relacionades amb la calefacció, els aparells elèctrics, la il·luminació i l'ACS, així com la utilització d'aquests, s'han extret de l'enquesta igual que en l'UBEM-híbrid però, en aquest cas, tenint en compte l'agrupació de les unitats cadastrals resultants de la fragmentació determinista. La Taula 5.2 presenta les principals propietats no-geomètriques introduïdes en l'UBEM-determinista així com la seva correspondència amb l'UBEM-híbrid.

		UBEM-híbrid							
Clústers		RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Ocupació (p/m ²)		0,021	0,032	0,027	0,030	0,009	0,007	0,007	0,006
Il·luminació (W/m ²)		0,82	1,09	1,22	1,22	0,29	0,24	0,23	0,18
Aparells elèctrics (W/m ²)		24,33	31,34	19,74	22,46	14,42	12,82	14,59	11,01
Calefacció									
Equip		Caldera fuel		R. elèctrics	R. elèctrics	Caldera fuel		Aerotèrmia	
Temperatura termòstat (en °C)	Dia	19,83	19,14	16,62	19,48	19,80	20,21	20,09	21
	Nit	18,70	19,96	18,90	18,97	18,52	18,65	18,33	21
ACS									
Consum (L/p)		22				30			
Temperatura d'ús (en °C)		60							
		UBEM-determinista							
Tipologies		RM				RS			
Ocupació (p/m ²)		0,022				0,007			
Il·luminació (W/ m ²)		0,84				0,25			
Aparells elèctrics(W/ m ²)		25,32				13,93			
Calefacció									
Equip		Caldera Fuel				Caldera Fuel			
Temperatura termòstat (en °C)	Dia	19,91				18,89			
	Nit	19,80				16,70			
ACS									
Consum (L/p)		22				30			
Temperatura d'ús (en °C)		60							

Taula 5.2. Comparativa de les principals propietats no-geomètriques introduïdes en l'UBEM-determinista segons el clúster i correspondència amb l'UBEM-híbrid

Font. Elaboració pròpia

Tot i que totes les propietats no-geomètriques introduïdes en ArchSim presenten diferències entre els dos models exceptuant l'ACS, s'aprecia que la principal diferència està en el sistema de calefacció. Les variables generalment utilitzades en la fragmentació determinista com són les tipologies i els anys de construcció, no permeten diferenciar els edificis que utilitzen electricitat o fuel domèstic per a la calefacció. A més, al ser el número d'edificis amb calefacció elèctrica més reduït que els edificis amb calefacció amb fuel domèstic (Capítol 2 secció 2.3.3.1), les dades extretes de les enquestes apunten per les dues tipologies de la fragmentació determinista que el sistema de producció de calefacció utilitza fuel domèstic.

5.2 Bondat d'ajust de l'UBEM-determinista i comparativa amb l'UBEM-híbrid

Un cop generat i simulat l'UBEM-determinista s'ha calculat la bondat d'ajust d'aquest de forma equivalent al realitzat en l'UBEM-híbrid. Val a dir que, prèviament al càlcul de la bondat d'ajust, les dades d'ús d'energia simulades i mesurades s'han harmonitzat de la mateixa manera que en l'UBEM-híbrid.

- **Validació general del parc edificat**

Tal com mostra la Figura 5.1, la simulació dels consums elèctrics del parc edificat agregats a escala anual presenta un error del 35% respecte a les dades d'ús d'energia mesurades, gairebé 6 vegades més que en l'UBEM-determinista. A diferència de l'UBEM-híbrid, els errors a escala de parc edificat són negatius, tant a escala anual com mensual. Aquest fet mostra un biaix negatiu de l'UBEM-determinista infraestimant el consum elèctric del parc edificat. Els errors màxim i mínim són del -53,7% i el -6,6% pels mesos d'agost i gener, respectivament. La Taula 5.3 presenta els valors d'error obtinguts així com els de la resta d'indicadors de bondat d'ajust (MAPE, RMSE i CV_{RMSE}). Amb l'objectiu de facilitar la comparativa, es mostren en vermell quan aquests són superiors, i per tant pitjors, als de l'UBEM-híbrid, i en verd, quan aquests són millors, és a dir inferiors. Aquest criteri s'aplica també en la resta de taules d'aquesta secció.

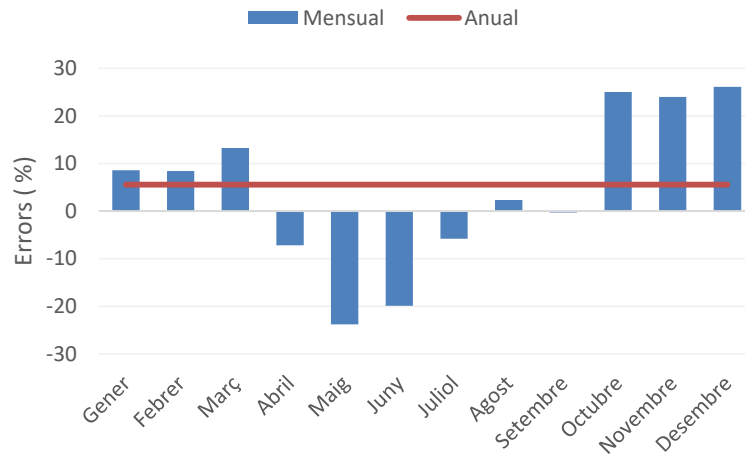


Figura 5.1. Error de l'UBEM-determinista a escala de parc edificat. Escala temporal anual (en vermell) i mensual (en blau)

Font. Elaboració pròpia

Igual que en l'UBEM-híbrid, a l'analitzar els errors a escala d'edifici o de planta els valors augmenten considerablement tal com mostra la Figura 5.2. En aquesta s'aprecia que el rang de valors és molt més ampli tant per la resolució anual com per les mensuals arribant a un valor màxim del 930% tant a escala d'edifici com de planta, valors inferiors als obtingut en l'UBEM-híbrid i que aquest fet succeeix en els mesos d'hivern.

Igual que pels errors de l'UBEM-híbrid, tot i presentar valors d'error màxims elevats, el 55,8% i el 61,8% segons l'agregació espacial, la majoria de les zones tèrmiques presenten errors inferiors al 50% a escala d'edifici i de planta tal com es mostra en la Figura 5.2.

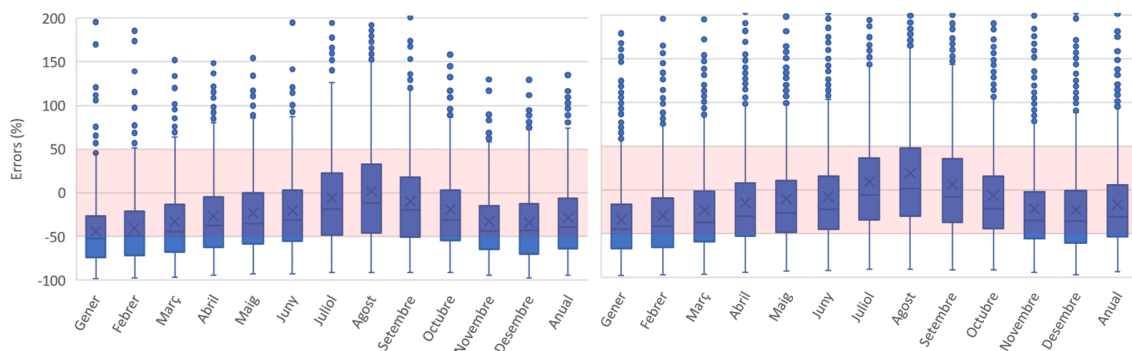


Figura 5.2. Errors anuals i mensuals a escala d'edifici (esquerra) i de planta (dreta) de l'UBEM-determinista

Font. Elaboració pròpia

En la Taula 5.3 s'aprecia que els valors de l'indicador MAPE en l'UBEM determinista a escala de parc edificat són pitjors en comparació als calculats en l'UBEM-híbrid, mentre que les resolucions espacials a escala d'edifici i planta presenten millors valors pels mesos de gener a abril i setembre a desembre, mesos en els quals la calefacció està en ús. Per contra, els mesos d'estiu presenten pitjors valors que en l'UBEM-híbrid. Aquest fet pot ser degut a que en la fragmentació determinista no s'ha tingut en compte la font d'energia per al sistema de calefacció per dividir el parc. Al representar els edificis amb calefacció elèctrica una proporció del parc edificat molt reduïda, en base a les enquestes l'UBEM-determinista assigna en tots els casos el fuel domèstic com a font energètica per a la calefacció. En aquest sentit, els millors valors de MAPE i CV_{RMSE} de l'UBEM-determinista poden ser deguts a que als edificis totalment elèctrics els manquen els usos de calefacció i ACS com es confirmarà més endavant en l'anàlisi de la bondat d'ajust de l'UBEM a escala d'arquitectes.

	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Octubre	Novembre	Desembre	Annual
Parc edificat													
E	-20,6	-19,1	-12,6	-14,2	-24,1	-20,7	-7,4	0,2	-6,2	-25,2	-38,9	-4,7	-11,9
MAPE	20,6	19,1	12,6	14,2	24,1	20,7	7,4	0,2	6,2	25,2	38,9	4,7	11,9
CV_{RMSE}	20,6	19,1	12,6	14,2	24,1	20,7	7,4	0,2	6,2	25,2	38,9	4,7	11,9
Resolució edifici													
E	-25,3	-22,2	-12,7	-10,2	-17,4	-13,7	1,6	10,7	2,6	15,3	-3,9	-10,3	-10,9
MAPE	53,9	52,5	53,9	49,2	44,0	44,1	47,0	51,4	49,9	68,5	60,8	55,6	49,8
CV_{RMSE}	85,8	83,9	87,0	69,3	58,8	58,6	58,9	63,1	61,5	107,1	107,0	100,9	73,2
Resolució planta													
E	-34,4	-29,7	-23,0	-15,1	-10,5	-7,7	9,3	19,4	6,5	-6,6	-21,4	-22,9	-17,0
MAPE	51,1	49,9	48,6	46,6	45,1	43,3	47,0	52,2	46,4	43,8	46,6	49,2	45,8
CV_{RMSE}	99,3	104,4	93,0	84,2	78,3	74,0	70,9	73,4	71,9	70,3	87,1	97,3	79,9

*E, MAPE i CV_{RMSE} en %

*Ressaltats en vermell els indicadors que presenten pitjors valors en l'UBEM-determinista, i en verd millors

Taula 5.3. Valors dels indicadors de bondat d'ajust mensuals i anuals segons l'agrupació espacial de les zones tèrmiques de l'UBEM-determinista.

Font. Elaboració pròpia

- **Validació a escala d'arquetips**

Tot i haver obtingut agrupacions diferents en la fragmentació determinista, per poder realitzar una comparació acurada dels resultats dels dos UBEM s'han agrupat els resultats de les zones tèrmiques de l'UBEM-determinista en base als grups obtinguts de la fragmentació híbrida definida en la present tesi.

Categoria RMF – Residencial plurifamiliar fuel

La validació del consum energètic elèctric dels arquetips pertanyents a la categoria RMF de l'UBEM-determinista inclouen els usos energètics de la il·luminació i els aparells elèctrics.

Els errors dels arquetips de la categoria RMF de l'UBEM-determinista es presenten en la Figura 5.3 i els valors dels indicadors de bondat d'ajust es detallen en la Taula 5.4. En aquesta s'aprecia que la majoria d'arquetips presenten pitjors valors que en el cas de l'UBEM-híbrid. Cal assenyalar que en els casos en els quals l'UBEM-determinista presenta millors valors, aquests són de l'ordre de l'1% al 6%, mentre que quan els valors són pitjors la diferència dels errors entre els dos models arriba al 38%. També s'aprecia que en la gran majoria de casos en els quals l'UBEM-determinista presenta millors valors dels indicadors d'ajust coincideixen amb els clústers "1", com és el cas dels clústers RMF1_A, RMF1_B1, RMF1_B2, i RMF1_C. Aquest fet indica que, tot i que l'UBEM-determinista permet obtenir valors equivalents als de l'UBEM-híbrid, i en el cas d'alguns clústers inclús lleugerament millors per les zones tèrmiques pertanyents als clúster 1, no ho aconsegueix en els edificis del clúster 2, evidenciant l'impossibilitat de definir-los amb els mateixos paràmetres.

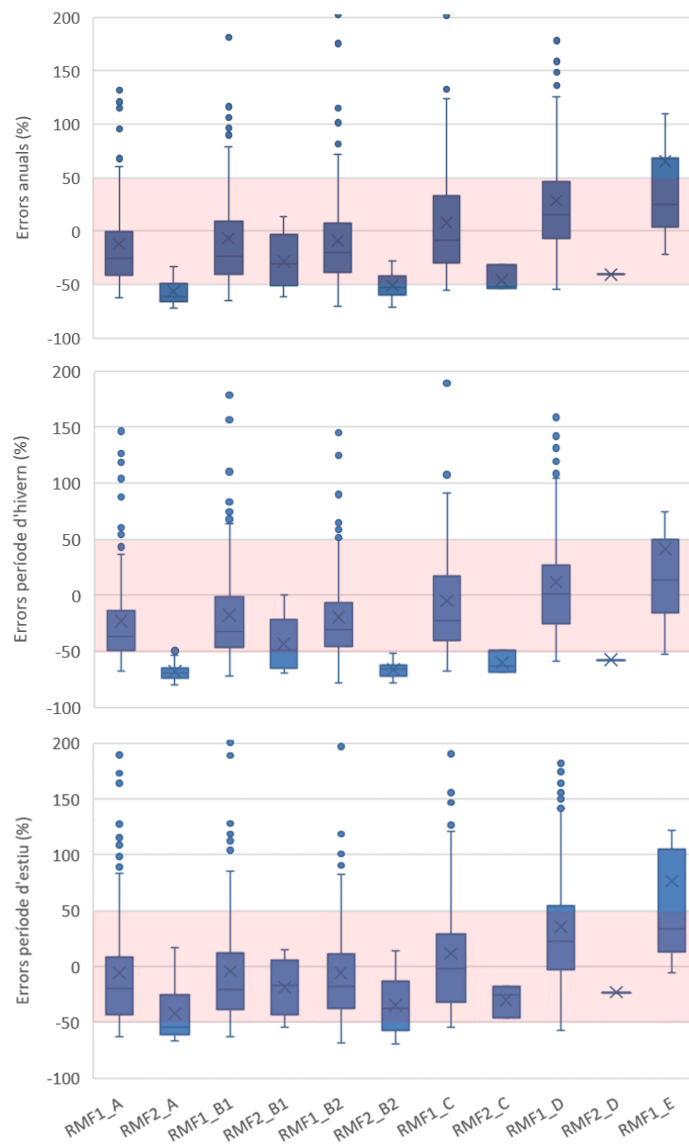


Figura 5.3. Errors de l'UBEM-determinista anuals i pels períodes d'hivern i d'estiu de la tipologia d'edificis RMF de l'UBEM-determinista

Font. Elaboració pròpia

	RMF1_A	RMF2_A	RMF1_B1	RMF2_B1	RMF1_B2	RMF2_B2	RMF1_C	RMF2_C	RMF1_D	RMF2_D	RMF1_E	RMF2_E
Recompte												
Nº plantes	143	18	182	9	245	17	138	3	214	1	11	0
Anual												
E	-12,2	-57,0	-6,8	-28,6	-9,0	-51,0	7,6	-45,9	28,5	-40,6	65,1	-
MAPE	36,4	57,0	38,9	34,6	33,7	51,0	39,2	45,9	43,9	40,6	72,9	-
CV _{RMSE}	52,1	73,4	53,2	44,6	43,9	108,3	42,9	53,4	47,3	40,6	60,9	-
Període d'hivern												
E	-23,3	-68,4	-17,4	-43,6	-19,7	-66,0	-4,9	-60,2	11,9	-57,9	41,6	-
MAPE	40,3	68,4	40,8	43,8	36,9	66,0	39,4	60,2	38,4	57,9	62,1	-
CV _{RMSE} (en %)	57,9	77,8	60,6	61,4	50,4	72,9	49,0	66,1	45,9	57,9	55,2	-
Període d'estiu												
E	-5,5	-41,9	-4,3	-18,7	-5,7	-34,5	11,6	-29,9	35,7	-23,1	76,6	-
MAPE	38,2	44,7	39,4	25,4	35,1	37,2	40,2	29,9	49,0	23,1	77,6	-
CV _{RMSE} (en %)	54,4	78,3	52,6	33,2	44,9	58,7	44,1	47,7	52,0	23,1	73,0	-

*E, MAPE i CV_{RMSE} en %

*Ressaltats en vermell els indicadors que presenten pitjors valors en l'UBEM-determinista, i en verd millors

Taula 5.4. Valors dels indicadors de bondat d'ajust de l'UBEM-determinista pels arquetips de tipus RMF segons la resolució temporal

Font. Elaboració pròpia

Categoria RME – Residencial plurifamiliar elèctric

La validació del consum energètic elèctric dels arquetips pertanyents a la categoria RME de l'UBEM-determinista inclouen els usos energètics de la il·luminació i els aparells elèctrics. Els errors dels arquetips de la categoria RME de l'UBEM-determinista es presenten en la Figura 5.4. En aquesta s'aprecia que contràriament als errors de l'UBEM-híbrid, en el cas de l'UBEM-determinista el rang de valors és molt més reduït a excepció de l'arquetip RME1_C i que els errors són en la gran majoria negatius. Això indica que l'UBEM-determinista infraestima els consums reals de les zones tèrmiques de la categoria RME. Com s'ha avançat anteriorment, els resultats d'energia d'ús mesurats tant sols tenen en compte els àmbits de la il·luminació i els aparells elèctrics ja que a través de la fragmentació determinista no és possible diferenciar el tipus de font d'energia per la calefacció. Això és degut a que, al representar els edificis amb calefacció elèctrica una part del parc tant poc significativa, les enquestes sempre identifiquen la caldera de fuel domèstic com a sistema de calefacció predominant als diferents arquetips. En aquest sentit, disposar d'informació sobre les fonts

d'energia utilitzades als habitatges és imprescindible per poder estimar adequadament la bondat d'ajust, altrament es poden arribar a conclusions errònies.

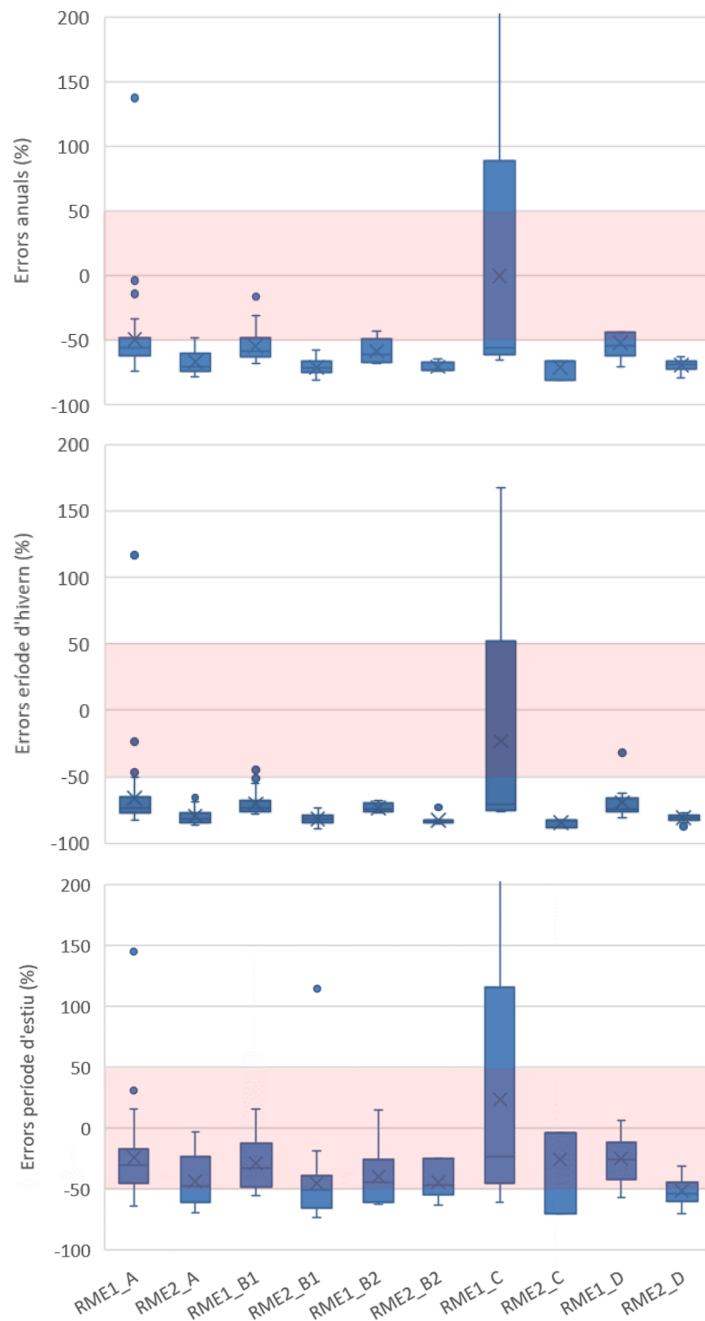


Figura 5.4. Errors de l'UBEM-determinista anuals i pels períodes d'hivern i d'estiu de la tipologia d'edificis RME de l'UBEM-determinista

Font. Elaboració pròpia

Pel que fa als valors dels indicadors de bondat d'ajust de les zones tèrmiques pertanyents a la categoria RME mostrats en la Taula 5.5, s'aprecia que en el període d'estiu la majoria d'arquetips presenten pitjors valors que en l'UBEM-híbrid. D'altra banda, en el període d'hivern la meitat dels arquetips presenten valors millors i l'altra meitat pitjors degut a la manca dels consums dels àmbits de la calefacció i l'ACS. Igual que per als arquetips de la categoria RMF, s'observa que els arquetips que presenten millors valors dels indicadors de bondat d'ajust en l'UBEM-determinista es limiten als clústers 1, reforçant la idea que la subdivisió aportada per la fragmentació híbrida és necessària per poder definir de forma més acurada les zones tèrmiques de l'UBEM.

	RME1_A	RME2_A	RME1_B1	RME2_B1	RME1_B2	RME2_B2	RME1_C	RME2_C	RME1_D	RME2_D
Recompte										
Nº plantes	44	21	24	25	8	11	5	3	13	14
Anual										
E	-49,4	-66,7	-54,2	-70,6	-58,4	-70,5	-0,1	-71,1	-52,0	-69,4
MAPE	55,6	66,7	54,2	70,6	58,4	70,5	88,2	71,1	52,0	69,4
CV _{RMSE}	63,9	80,1	74,7	78,6	68,4	80,0	76,5	80,5	46,9	77,0
Hivern										
E	-66,1	-79,5	-70,1	-82,0	-73,2	-82,6	-23,3	-84,2	-69,2	-80,8
MAPE	71,4	79,5	70,1	82,0	73,2	82,6	90,2	84,2	69,2	80,8
CV _{RMSE}	80,9	90,0	89,2	90,2	79,6	91,0	101,9	88,1	57,4	90,6
Estiu										
E	-24,5	-43,5	-29,2	-45,0	-39,8	-44,8	23,5	-25,8	-25,1	-51,8
MAPE	34,7	43,5	32,2	54,1	43,5	44,8	73,5	25,8	26,8	51,8
CV _{RMSE}	44,6	69,5	61,1	63,0	73,7	56,8	56,8	78,7	32,6	57,9

*E, MAPE i CV_{RMSE} en %

* Ressaltats en vermell els indicadors que presenten pitjors valors en l'UBEM-determinista, i en verd millors

Taula 5.5. Valors dels indicadors de bondat d'ajust de l'UBEM-determinista pels arquetips de tipus RME per cadascuna de les tres resolucions temporals

Font. Elaboració pròpia

Categoria RSF – Residencial unifamiliar fuel

La validació del consum energètic elèctric dels arquetips pertanyents a la categoria RSF de l'UBEM-determinista inclouen els usos energètics de la il·luminació i els aparells elèctrics.

Els errors dels arquetips de la categoria RSF de l'UBEM-determinista es presenten en la Figura 5.5 i els valors dels indicadors de bondat d'ajust en la Taula 5.6.

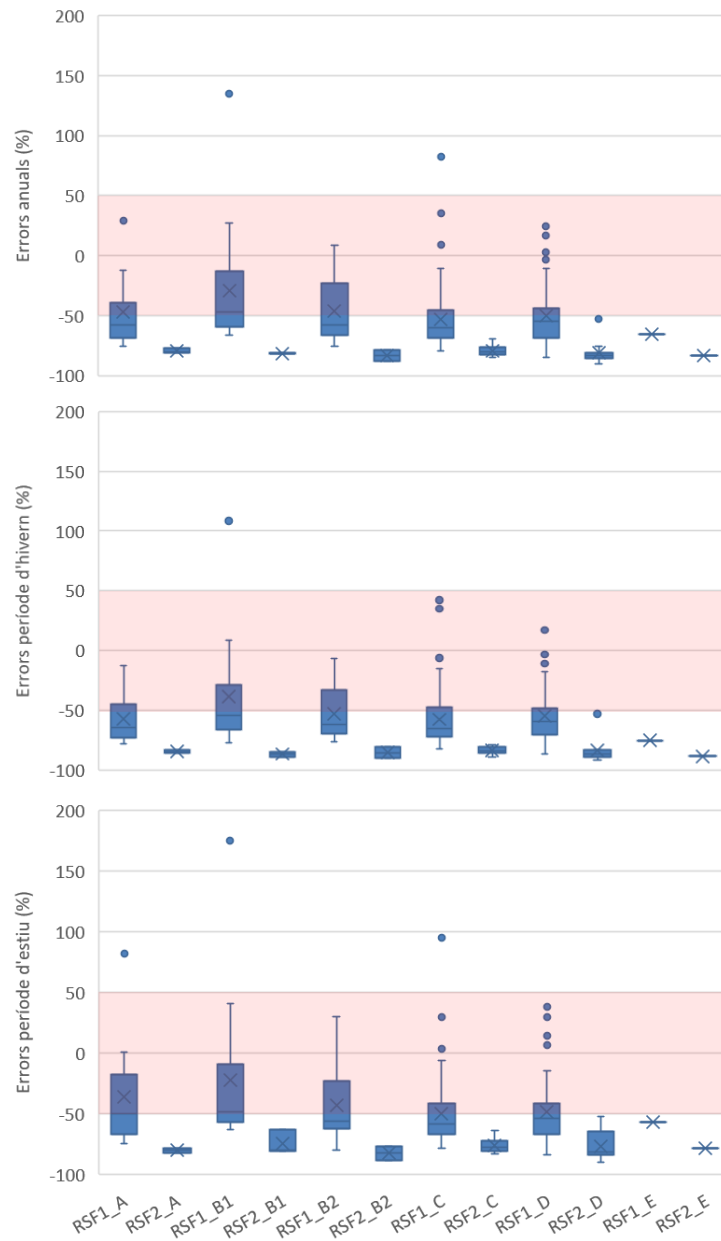


Figura 5.5. Errors de l'UBEM-determinista anuals i pels períodes d'hivern i d'estiu de la tipologia d'edificis RSF de l'UBEM-determinista

Font. Elaboració pròpia

En la Taula 5.6 tant sols s'aprecien millors valors respecte l'UBEM-híbrid en el període d'estiu, mentre que pel període d'hivern tots els clústers presenten pitjors valors dels indicadors de bondat d'ajust. Igual que en les tipologies RMF i RME, els arquetips que presenten millors valors dels indicadors de bondat d'ajust que per l'UBEM-determinista mostren diferències d'entre l'1% i el 8%, mentre que en els casos en els quals l'UBEM-híbrid presenta millors resultats dels indicadors, la diferència amb els valors de l'UBEM-determinista arriben al 94% en alguns arquetips.

	RSF1_A	RSF2_A	RSF1_B1	RSF2_B1	RSF1_B2	RSF2_B2	RSF1_C	RSF2_C	RSF1_D	RSF2_D	RSF1_E	RSF2_E
Recompte												
Nº Plantes	12	3	15	3	24	2	84	14	57	11	1	1
Anual												
E	-47,4	-79,6	-28,9	-81,5	-46,6	-83,3	-53,2	-79,3	-50,4	-80,8	-65,9	-83,6
MAPE	52,2	79,6	50,5	81,5	47,4	83,3	56,2	79,3	52,1	80,8	65,9	83,6
CV _{RMSE}	65,6	85,7	59,6	85,7	71,0	89,3	87,9	95,4	77,6	110,1	65,9	83,6
Hivern												
E	-57,5	-84,7	-38,9	-86,8	-52,9	-85,6	-57,9	-83,6	-55,1	-84,0	-75,6	-88,7
MAPE	57,5	84,7	54,4	86,8	52,9	85,6	59,8	83,6	55,7	84,0	75,6	88,7
CV _{RMSE}	72,0	88,0	69,6	98,4	75,6	92,0	93,5	95,4	81,0	107,5	75,6	88,7
Estiu												
E	-36,1	-80,4	-22,2	-74,8	-43,5	-82,8	-50,3	-76,5	-48,7	-77,3	-57,4	-78,7
MAPE	49,8	80,4	51,0	74,8	47,4	82,8	54,0	76,5	52,4	77,3	57,4	78,7
CV _{RMSE}	67,4	85,2	56,8	76,3	72,5	90,0	88,4	97,9	78,3	118,5	57,4	78,7

*E, MAPE i CV_{RMSE} en %

* Ressaltats en vermell els indicadors que presenten pitjors valors en l'UBEM-determinista, i en verd millors

Taula 5.6. Valors dels indicadors de bondat d'ajust de l'UBEM-determinista pels arquetips de tipus RSF per cadascuna de les tres resolucions temporals

Font. Elaboració pròpia

Categoria RSE – Residencial unifamiliar elèctric

La validació del consum energètic elèctric dels arquetips pertanyents a la categoria RSE de l'UBEM-determinista inclouen els usos energètics de la il·luminació i els aparells elèctrics. Els errors dels arquetips de la categoria RSE de l'UBEM-determinista es presenten en la Figura 5.6 i els valors dels indicadors de bondat d'ajust en la Taula 5.7.

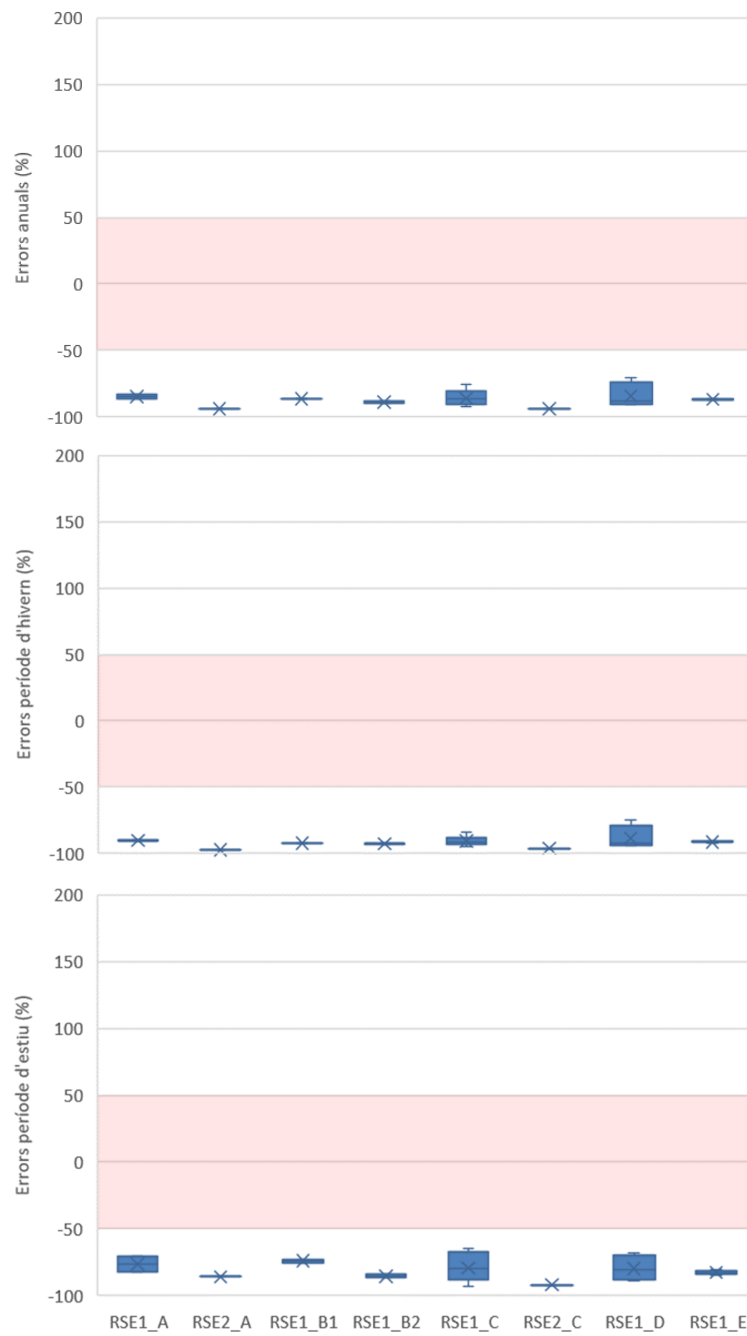


Figura 5.6. Errors de l'UBEM-determinista anuals i pels períodes d'hivern i d'estiu de la tipologia d'edificis RSE de l'UBEM-determinista

Font. Elaboració pròpia

En la Taula 5.7 s'aprecia com tots els indicadors dels arquetips RSE presenten valors pitjors respecte els de l'UBEM-híbrid. En la Figura 5.6 s'aprecia com a diferència dels errors de l'UBEM-híbrid, els errors de l'UBEM-determinista presenten un biaix negatiu degut a que, igual que pel cas de l'arquetip RME, en els valors de consum simulat no s'han inclòs els usos de calefacció i ACS ja que la fragmentació de l'UBEM-determinista no permet diferenciar la font energètica minoritària per la calefacció, és a dir l'elèctrica.

	RSE1_A	RSE2_A	RSE1_B1	RSE1_B2	RSE1_C	RSE2_C	RSE1_D	RSE1_E
Recoppte								
Nº plantes	2	1	2	2	9	1	4	4
Anual								
E	-84,6	-94,1	-86,4	-88,9	-85,8	-93,6	-84,2	-86,8
MAPE	84,6	94,1	86,4	88,9	85,8	93,6	84,2	86,8
CV _{RMSE}	90,0	94,1	107,3	90,5	103,3	93,6	102,1	92,2
Hivern								
E	-90,2	-97,1	-92,2	-92,5	-90,7	-96,0	-88,3	-91,2
MAPE	90,2	97,1	92,2	92,5	23,4	64,4	50,1	91,2
CV _{RMSE}	100,9	97,1	115,5	94,6	101,3	96,0	110,2	98,4
Estiu								
E	-76,3	-85,8	-74,0	-85,4	-79,2	-91,8	-79,6	-82,7
MAPE	76,3	85,8	74,0	85,4	79,2	79,6	79,6	82,7
CV _{RMSE}	75,8	85,8	94,7	86,4	114,0	91,8	95,0	84,7

*E, MAPE i CV_{RMSE} en %

* Ressaltats en vermell els indicadors que presenten pitjors valors en l'UBEM-determinista, i en verd millors

Taula 5.7. Valors dels indicadors de bondat d'ajust de l'UBEM-determinista pels arquetips de tipus RSF per cadascuna de les tres resolucions temporals

Font. Elaboració pròpia

5.3 Síntesi de la validació de la metodologia híbrida

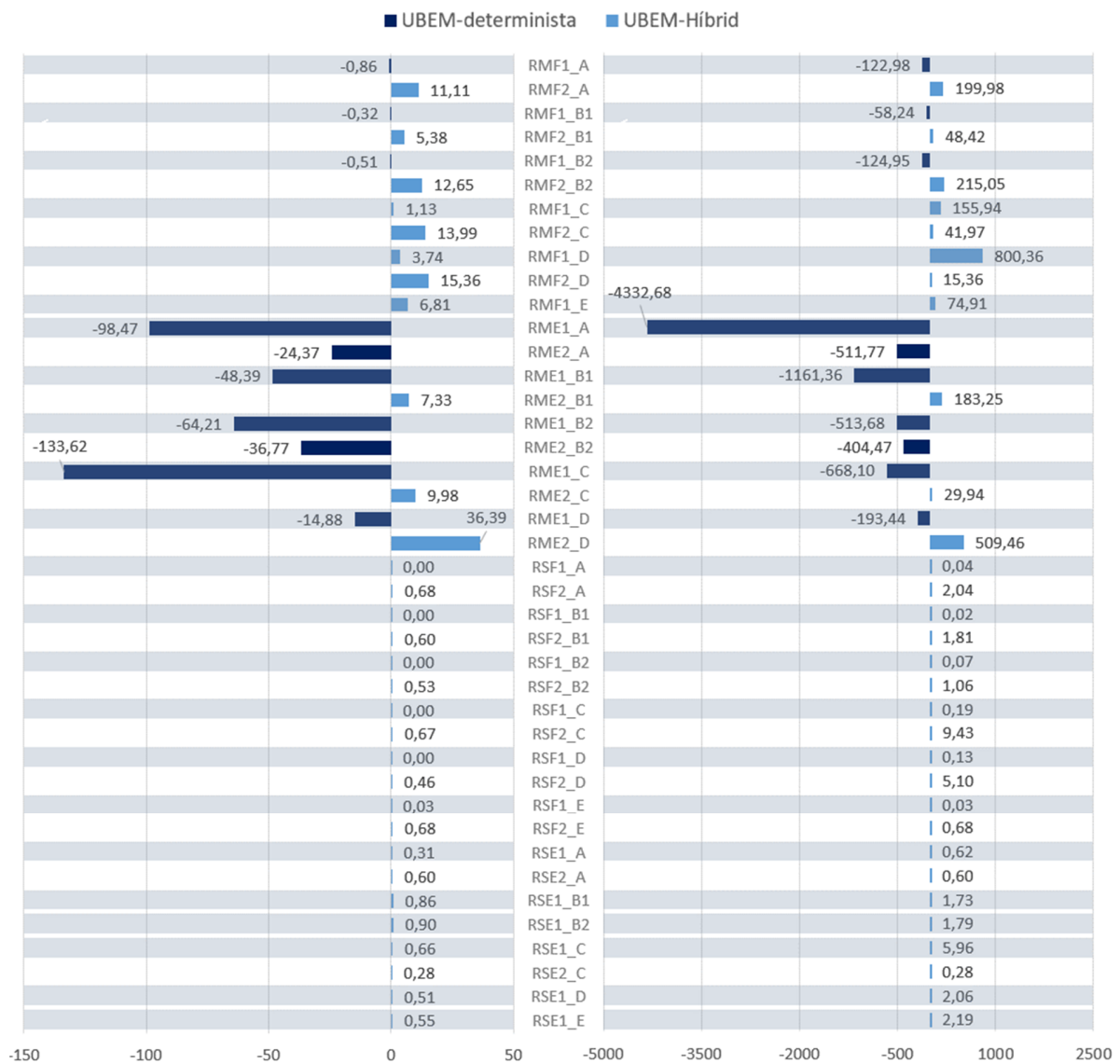
Al llarg del present capítol s'ha constatat que, a escala de parc edificat i en la majoria d'arquetips, els indicadors de bondat d'ajust presenten millors valors en l'UBEM-híbrid que en l'UBEM-determinista. La Figura 5.7 i la Figura 5.8 presenten respectivament la diferència dels resultats obtinguts dels indicadors MAPE i CV_{RMSE} entre l'UBEM-determinista i l'UBEM-híbrid obtenint un valor positiu quan l'UBEM-híbrid presenta millors valors i un valor negatiu quan ho fa l'UBEM-determinista. Per valorar els resultats de bondat d'ajust

total de cada arquetip, la diferència dels indicadors s'ha ponderat en funció del nombre de zones tèrmiques que conformen els arquetips.

En aquestes s'aprecia que en la majoria d'arquetips, tant l'indicador MAPE com CV_{RMSE} presenten millor valors per l'UBEM-híbrid. A més, en els casos en els quals l'UBEM-determinista presenta millors valors, aquests són molt propers als valors de l'UBEM-híbrid amb diferències poc significatives. L'excepció es dona en els arquetips de la categoria RME ja que al no poder diferenciar els edificis disposant de sistema de calefacció elèctrica en la fragmentació determinista, pels arquetips totalment elèctrics, és a dir els pertanyents a les categories RME i RSE, els manca el consum corresponen als usos energètics de calefacció i ACS en les dades d'ús d'energia simulades. Malgrat això, alguns arquetips presenten millors valors per l'UBEM-híbrid com és el cas dels arquetips RME2_B1, RME2_C, i RME2_D, per l'indicador MAPE, i els arquetips RME2_A, RME1_B1, RME2_B1, RME2_C, i RME2_D per l'indicador CV_{RMSE} .

En base als resultats obtinguts s'aprecia que els arquetips que presenten millors valors dels indicadors de bondat d'ajust en l'UBEM-determinista corresponen generalment als clústers 1. Això indica que la subdivisió realitzada en la fragmentació de l'UBEM-híbrid aporta major fiabilitat al model ja que quan els clústers 1 i 2 es defineixen amb els mateixos paràmetres, com és el cas de l'UBEM-determinista, pel clúster 1 s'obtenen valors similars a l'UBEM-híbrid, mentre que pel clúster 2 els valors dels indicadors de bondat d'ajust empitjoren considerablement.

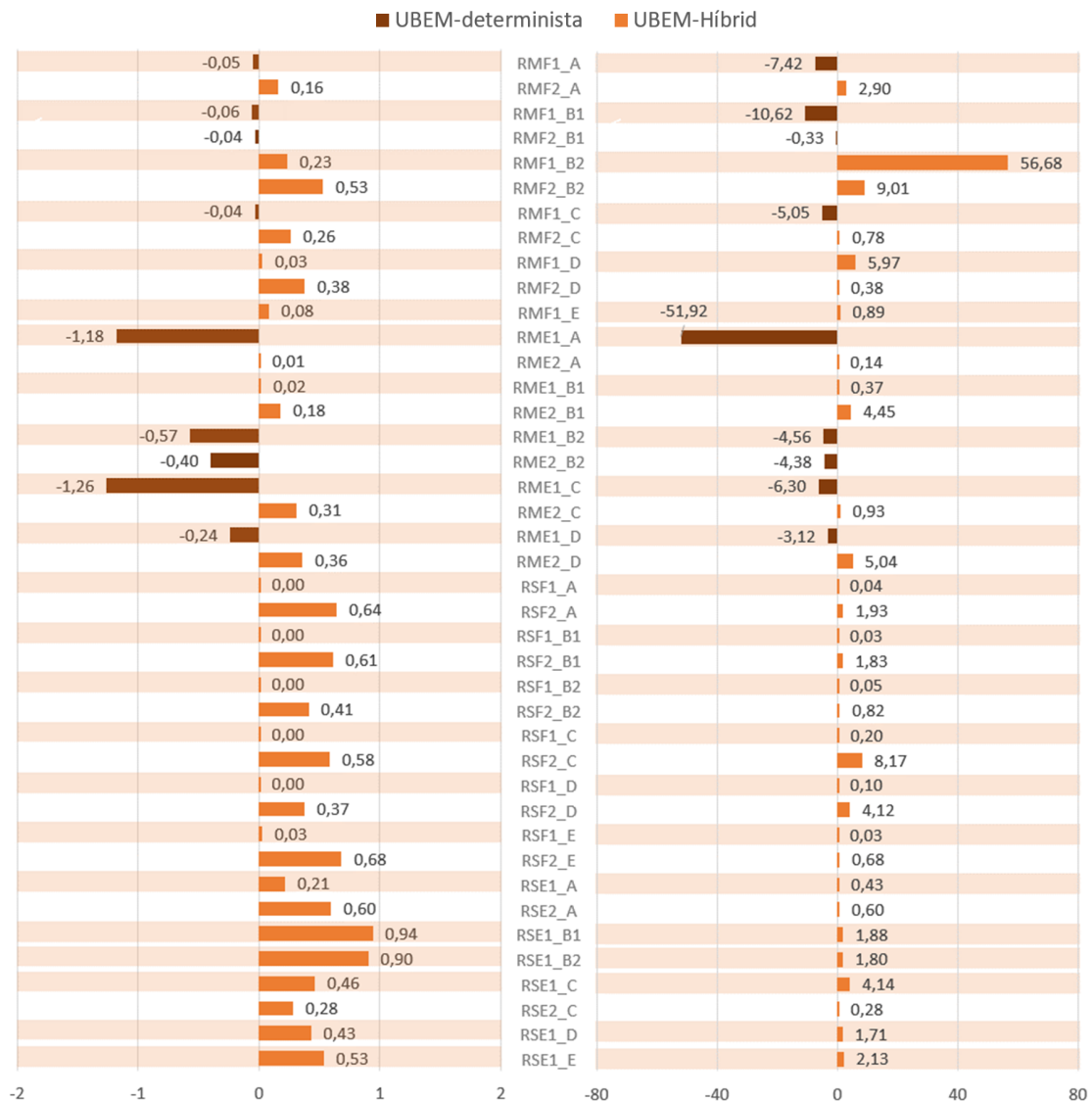
És important destacar que els clústers 2 són els grups minoritaris composts sempre per un nombre inferior de zones tèrmiques en comparació als clústers 1. Per aquest motiu, quan es tenen en compte les zones tèrmiques dels arquetips, són els clústers 1 els que presenten millors valors. En aquest sentit, la nova metodologia híbrida permet tenir una major representació dels edificis minoritaris que passen desapercebuts en la fragmentació-determinista.



*Ombrejat en blau els valors corresponents als clústers 1

Figura 5.7. Diferència dels valors obtinguts pels indicadors MAPE de l'UBEM-determinista i l'UBEM-híbrid (esquerra), i diferència ponderada segons la quantitat de zones tèrmiques (dreta)

Font. Elaboració pròpia



* Ombrejat en taronja els valors corresponents als clústers 1

Figura 5.8. Diferència dels valors obtinguts pels indicadors CV_{RMSE} de l'UBEM-determinista i l'UBEM-híbrid (esquerra), i diferència ponderada segons la quantitat de zones tèrmiques (dreta)

Font. Elaboració pròpia

Per últim, un aspecte a remarcar és la importància de conèixer la font d'energia dels diferents usos energètics presents en el parc edificat per poder estimar adequadament la bondat d'ajust. En el cas de l'UBEM-determinista, els arquetips pertanyents a les categories RME i RSE presenten millors valors de bondat d'ajust que per l'UBEM-híbrid degut a que no s'està tenint en compte la totalitat del consum. En aquest sentit, disposar de mesures d'ús

d'electricitat ha permès en el cas d'estudi d'Escaldes-Engordany poder distingir els edificis que disposen de fuel domèstic o d'electricitat per la calefacció, principal ús d'energia als edificis, i confirmant així el potencial d'utilitzar dades de consum energètic en aquest tipus de models.

6 CONCLUSIONS

L'habilitat dels models per donar suport a la presa de decisions depèn de la fiabilitat dels seus resultats, així com de la capacitat d'aquests de reproduir els aspectes més significatius dels objectes que representen. En el cas dels UBEM, aconseguir replicar amb exactitud la realitat energètica de tots els edificis en un model a escala urbana és una tasca de gran complexitat. L'escassetat de dades sobre els edificis i el seu ús requereix de la incorporació de simplificacions i assumpcions, tal com s'ha presentat en l'UBEM d'Escaldes-Engordany, origen del desajust entre els resultats dels UBEM i la realitat energètica del parc edificat.

Malgrat ser raonable l'obtenció de certs desajustos atès que els models no deixen de ser representacions de la realitat, els resultats dels UBEM realitzats fins a dia d'avui presenten desajustos massa importants com per ser acceptables per fonamentar decisions en matèria d'eficiència energètica. No s'ha d'oblidar que la finalitat d'aquests és comprendre, amb un cert nivell de detall, on i com es consumeix l'energia, així com les variacions d'aquesta amb l'aplicació de diferents mesures d'estalvi energètic tenint en compte els costos associats. Conseqüentment, si els UBEM sobre els quals es realitzen les projeccions futures presenten desajustos molt importants, els resultats seran poc fiables. Aquestes limitacions en la precisió dels UBEM requereixen ser abordades per aconseguir una plena utilització d'aquests com a eines eficaces per a la presa de decisions.

Considerat com un dels majors reptes en el camp d'estudi dels UBEM, el desenvolupament d'arquetips és la simplificació més crítica de tot el procés d'implementació dels UBEM, responsable de gran part de les incerteses influint directament en els resultats d'aquests. Existeix una important incertesa sobre el parc edificat degut principalment a la manca de dades de qualitat disponibles relacionades amb els edificis, el que dificulta l'elaboració d'arquetips. La reducció del desajust entre els resultats dels UBEM i els consums reals ha estat objecte de nombrosos treballs de recerca recentment, però mentre la gran majoria d'aquests apunten al calibratge dels UBEM com la solució a aquest desajust, pocs aborden la qüestió de la fragmentació.

L'abstracció dels grans estocs d'edificis en grups representatius mitjançant el mètode i les dades més tradicionals com l'ús dels edificis, la superfície, la forma o l'any de construcció no són suficient per cobrir la diversitat dels edificis presents, no aconseguint plasmar en els models la gran varietat de sistemes i aparells elèctrics presents en els edificis, així com la pròpia aleatorietat intrínseca del comportament dels ocupants.

La present tesi doctoral proposa una nova metodologia de fragmentació híbrida que combina la típica fragmentació determinista amb un anàlisi de clúster per poder superar les limitacions de la fragmentació determinista amb l'objectiu d'obtenir arquetips representatius.

6.1 Conclusions generals

La nova metodologia de fragmentació desenvolupada en la present tesi doctoral, així com la seva implementació en l'UBEM de la parròquia d'Escaldes-Engordany permet treure les conclusions que s'exposen a continuació.

En la relació a la metodologia de fragmentació desenvolupada, es conclou que:

- **La metodologia de fragmentació híbrida desenvolupada en la present tesi doctoral permet reduir els desajustos dels UBEM implementats a partir de fragmentacions deterministes.** La comparació dels valors dels indicadors de bondat d'ajust dels usos energètics elèctrics de l'UBEM-híbrid i l'UBEM-determinista posa de manifest el potencial d'aquesta nova metodologia. Els indicadors de bondat d'ajust presenten millors resultats tant a escala anual com mensual aconseguint replicar el consum elèctric dels edificis amb un desajust del 6% a escala anual i a escala de parc edificat, lluny del 35% obtingut amb l'UBEM-determinista.
- **La metodologia proposada que incorpora l'anàlisi de clúster complementa la metodologia tradicional determinista de fragmentació permetent la identificació de grups d'edificis minoritaris.** En el cas de l'UBEM d'Escaldes-Engordany, tot i obtenir valors dels indicadors de bondat d'ajust molt similars entre l'UBEM-híbrid i l'UBEM-determinista, aquest fet tan sols es dona per les zones tèrmiques pertanyents a un dels dos grups resultants de l'anàlisi de clúster (arquetips pertanyents als clústers 1) que és generalment el grup compost per la majoria de zones tèrmiques, demostrant la necessitat de la divisió obtinguda amb l'anàlisi de clúster per poder representar adequadament els edificis. En aquest sentit, cal seguir explorant l'ús de tècniques de *machine learning* com l'anàlisi de clúster emprat en aquesta tesi per poder-ne extreure tot el seu potencial en el camp d'estudi dels UBEM mitjançant l'exploració d'altres d'algoritmes, així com la incorporació de noves variables.

- **L'ús de dades de consum d'energia permeten l'obtenció d'arquetips addicionals composts per edificis amb consums energètics més homogenis respecte a la fragmentació determinista.** Tanmateix, l'ús d'aquest tipus de dades comporta un esforç addicional d'organització i depuració. Un aspecte important a l'hora d'utilitzar dades de consum energètic en la fragmentació és conèixer si aquestes corresponen al consum total o parcial, i en el cas de ser parcial distingir els usos energètics que abasteixen. En el cas d'Escaldes-Engordany, no haver diferenciat els edificis totalment elèctrics dels que disposen de fuel domèstic prèviament a l'anàlisi de clúster hagués comportat una agrupació dels edificis errònia. A més, aquesta diferenciació també ha estat indispensable per poder dur a terme una validació apropiada dels resultats.
- **L'aplicació de la nova metodologia de fragmentació ha evidenciat la importància de realitzar-la mitjançant dades a resolucions espacials inferiors a l'escala d'edifici.** L'ús de dades a escala d'unitat cadastral en la fragmentació realitzada en el parc edificat d'Escaldes-Engordany ha permès identificar patrons energètics diferents entre habitatges pertanyents a un mateix edifici, i inclús a una mateixa planta, impossible de discernir utilitzant dades a escala d'edifici, representant millor la heterogeneïtat i diversitat present en el parc edificat.

En relació a la implementació de models energètics d'edificis a escala urbana com els UBEM, es conclou que:

- **Disposar de dades relacionades amb el comportament energètic dels edificis és imprescindible a l'hora d'implementar models *bottom-up* com els UBEM.** Pel que fa a aquestes es destaquen els següents aspectes:
 - El sector de l'edificació pateix una important **escassetat de dades** que cal esmenar en els propers anys. En el cas de l'UBEM d'Escaldes-Engordany aquesta manca d'informació s'ha compensat mitjançant la realització de treball de camp per completar les dades cadastrals, així com la realització d'enquestes a una mostra representativa del parc per recopilar les propietats no-geomètriques dels edificis. A més, les dades obtingudes de l'enquesta s'han completat recorrent a estudis i bases de dades dels països veïns com ha estat el cas de les propietats arquitectòniques dels edificis, així com els valors de potència dels diferents aparells elèctrics i sistemes presents en les llars. Val a dir que tota aquesta feina de recopilació de dades ha

suposat un important esforç addicional a tenir en compte a l'hora d'implementar un UBEM.

- **L'accessibilitat limitada** a les dades existents relacionades amb els aspectes energètics dels edificis és encara a dia d'avui una barrera a superar. Aquest fet succeeix principalment en el cas de les dades de consum d'energia a causa de les estrictes polítiques de confidencialitat de les companyies subministradores d'energia. L'accés a les dades de les institucions públiques també pot ser tot un repte a causa de la manca de transparència d'aquestes. Per exemple, en el cas d'Escaldes-Engordany, les dades cadastrals no són públiques i l'accés a aquestes no és gratuït, igual que la informació relacionada amb la font energètica dels sistemes de calefacció dels edificis recopilada, en aquest cas, pel Ministeri de Medi Ambient.

En aquest sentit, **és imprescindible que els governs i institucions públiques implementin protocols per recopilar dades i fer-ne un seguiment periòdic per crear bases de dades conjuntament**, no només del sector de l'edificació sinó de tots els sectors implicats en el consum energètic, permetent tenir un millor coneixement de l'estat actual del sector així com de les tendències futures.

- **L'eina de generació de l'UBEM, i especialment la seva escala espacial de treball, és determinant a l'hora d'escollir la metodologia de fragmentació a implementar.**

Com s'ha presentat en el Capítol 3 de la tesi, en l'actualitat existeix una gran varietat d'eines utilitzables per implementar un UBEM molt diferents sobretot pel que fa a la resolució espacial de la definició dels paràmetres no-geomètrics, així com a l'obtenció dels resultats. Bona part de les eines més utilitzades per la generació d'UBEM no permeten la definició de les propietats no-geomètriques ni l'obtenció dels resultats de les simulacions a una escala inferior a la d'edifici. En aquests casos, els beneficis d'aplicar la metodologia de fragmentació proposada serien molt limitats ja que no permetrien implementar-la a escala d'unitat cadastral. En aquest sentit, l'eina ArchSim utilitzada en la present tesi doctoral és en l'actualitat una de les poques eines capaç d'implementar la metodologia de fragmentació híbrida desenvolupada en la present tesi.

En relació a l'adopció i la transferibilitat de la nova metodologia híbrida proposada, es conclou que:

- **La implementació de la metodologia de fragmentació híbrida és més intensiva en l'ús de dades en comparació a la fragmentació determinista derivant en un important esforç addicional.** En el cas de l'UBEM d'Escaldes-Engordany es passa de dues tipologies en la fragmentació determinista (RM i RS), a vuit en la fragmentació híbrida (RMF1, RMF2, RME1, RME2, RSF1, RSF2, RSE1, i RSE2). L'increment del nombre de grups a definir aporta més complexitat al model generat i exigeix un nombre superior de propietats a definir, el que es tradueix en un major requeriment de dades. En aquest sentit, l'aplicació d'aquesta nova metodologia es recomanable en ciutats que disposin de dades relacionades amb els edificis més enllà de les típiques dades cadastrals, així com de la col·laboració de les empreses de subministrament d'energia.
- **Malgrat l'esforç addicional que comporta la implementació d'aquesta nova metodologia, aquest es concentra principalment en la primera implementació, sent les posteriors actualitzacions menys intensives.** Per exemple, en el cas de l'UBEM d'Escaldes-Engordany, molts dels processos realitzats com l'anàlisi de les enquestes o la depuració i organització de dades s'han automatitzat amb R facilitant així les futures actualitzacions del model.
- **Els UBEM són una eina fonamental per aconseguir atènyer els ambiciosos objectius d'estalvi energètic del sector de l'edificació de manera eficaç, tanmateix l'adopció generalitzada d'aquests dependrà de la fiabilitat dels seus resultats.** Tot i la reducció dels desajustos de l'UBEM-híbrid d'Escaldes-Engordany en comparació amb l'UBEM-determinista, en el cas d'algunes zones tèrmiques aquests encara continuen sent massa importants com per poder basar decisions polítiques. Aquesta tesi posa de manifest l'important rol que juga la fragmentació en els resultats dels UBEM fins ara relegada a un segon pla. Tanmateix, la replicació d'aquesta metodologia en altres ciutats permetria enriquir i donar més robustesa a aquesta conclusió.

6.2 Aportacions associades al cas d'estudi

La principal aportació d'aquesta tesi és la definició i implementació d'una nova metodologia híbrida de fragmentació del parc edificat que redueix el desajust entre els resultats dels UBEM i les dades d'ús d'energia mesurades. En el procés d'assoliment

d'aquest objectiu a través del cas d'estudi presentat, s'han generat una sèrie d'aportacions específiques d'utilitat per Escaldes-Engordany i, de forma extensiva, per al Principat d'Andorra: (1) l'UBEM de la parròquia d'Escaldes-Engordany, (2) la base de dades aglutinant les diferents dades recopilades i generades durant la caracterització, (3) els resultats de l'anàlisi de discriminant per determinar la font d'energia utilitzada per a la calefacció, (4) l'enquesta energètica creada per recopilar les propietats no-geomètriques dels edificis i (5) el fitxer climàtic TMY generat.

L'UBEM d'Escaldes-Engordany generat durant el transcurs de la present tesi doctoral amb l'objectiu d'avaluar la nova metodologia de fragmentació proposada és una de les principals aportacions de la tesi. Aquest permet obtenir informació sobre el consum energètic actual del parc edificat residencial de la parròquia a escala de planta distingint els diferents usos energètics de les llars. En aquest sentit, tenir un millor coneixement sobre la realitat energètica del parc edificat residencial és essencial per donar suport a la planificació energètica i urbanística de la parròquia. Una de les principals utilitats dels models *bottom-up* com els UBEM és explorar escenaris futurs integrant mesures d'estalvi energètic per avaluar-ne el potencial d'estalvi així com la seva cost-efectivitat. En el transcurs de la present tesi doctoral, el Principat d'Andorra ha experimentat avenços cap a la transició energètica del país com l'aprovació de la *llei d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc)* (BOPA 21/2018) que estableix de manera legal i per primera vegada, objectius i compromisos concrets en matèria d'emissions i producció energètica a Andorra. La Litecc defineix mesures decidides especialment en l'àmbit de l'edificació i la mobilitat per tal de poder assolir els objectius proposats. Es tracta d'una reforma ambiciosa per avançar cap a un model energètic més sostenible, amb una menor intensitat energètica, una major producció d'energia nacional i una reducció de la dependència de l'exterior. Tot i aquest important pas normatiu, és necessari que aquest es tradueixi en accions reals. En l'actualitat, els avenços en matèria d'eficiència energètica són limitats i aquest sector segueix sent un dels principals consumidors d'energia i responsable de les emissions de CO₂ al principat d'Andorra. En aquest context nacional, l'UBEM generat en el marc de la present tesi doctoral té un gran potencial com a eina de suport a la presa de decisions en les polítiques energètiques en l'àmbit de l'edificació ajudant a la transició energètica eficaç d'aquest sector. Per exemple, aquest podria ser de gran utilitat identificant amb criteris de cost-efectivitat les mesures d'eficiència energètica així com els edificis prioritaris on destinar els ajuts del Pla Renova^{6.1}, el programa d'incentius en matèria d'eficiència energètica promogut pel Govern

^{6.1} <https://www.mediambient.ad/renova>

d'Andorra. A més, Per tal de facilitar la consulta dels resultats obtinguts de l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'ha implementat un visor interactiu^{6.2}.

Una segona aportació de la present tesi és la creació de la **base de dades aglutinant totes les dades relacionades amb els edificis de la parròquia d'Escaldes-Engordany**. Aquesta integra tant les dades recopilades de les diferents institucions del país (dades del cadastre proporcionades pel Comú d'Escaldes-Engordany, dades de consum elèctric mensual subministrades per FEDA, i informació relacionada amb la font energètica per la calefacció provinents del ministeri de Medi Ambient del Govern d'Andorra), així com les generades durant el transcurs de la present tesi doctoral (respostes de les enquestes, resultat de l'anàlisi de clúster, resultats de la fragmentació, etc.). Un dels principals obstacles al qual es va fer front a l'inici de la tesi és la combinació de les dades provinents de les diferents institucions del país. L'absència històrica de cadastres al Principat d'Andorra ha provocat que les institucions identifiquin els edificis amb els seus propis identificadors impossibilitant la combinació de les dades de manera automàtica. En la present tesi ha estat necessari realitzar un treball inicial manual per associar cada comptador elèctric a la seva corresponent unitat cadastral. Aquesta tasca s'ha realitzat no només dels edificis residencials objecte de la present tesi sinó de la totalitat d'edificis d'Escaldes-Engordany. L'associació dels identificadors del Comú d'Escaldes-Engordany, de Govern i de FEDA ha estat essencial per implementar amb èxit la metodologia híbrida proposada en aquesta tesi i representa un exemple del potencial de disposar d'informació provinent de diferents fonts en una base de dades comuna. En aquest sentit, accelerar els avenços en els processos de recopilació de dades i en la col·laboració entre institucions tant a nivell parroquial com nacional seria beneficiós per a la recerca i, de ben segur també, per altres sectors estratègics del país.

La tercera aportació important de la present tesi és l'**enquesta energètica** creada per recopilar les propietats no-geomètriques a incorporar en el model (veure Annex C). Tot i haver estat creada per recopilar dades dels edificis de la parròquia d'Escaldes-Engordany i haver-la realitzat in-situ, aquesta està dissenyada per poder ser realitzada en qualsevol altra parròquia del país. Com també destaca Travesset-Baro (2017), és necessari destinar esforços en l'adquisició i generació de dades, així com fer-ne un seguiment periòdic, no només per generar models com els UBEM, sinó per tenir un coneixement més ampli de l'estat actual i les tendències futures dels principals sectors energètics dels país. Sens dubte, les enquestes proporcionen un bon mitjà d'obtenció de dades. Un clar exemple d'aquest tipus de pràctiques són els Estats Units on des de 1978 es realitza periòdicament l'enquesta sobre el consum energètic dels edificis residencials (RECS, de l'anglès *Residential Energy Consumption*

^{6.2} Accés al visor: <https://arcg.is/n1HCC>

Survey). A banda de la informació sobre els edificis residencials, l'EIA també realitza dos altres enquestes: l'enquesta sobre el consum energètic dels edificis comercials (CBECS, de l'anglès *Commercial Buildings Energy Consumption Survey*), i l'enquesta sobre el consum d'energia industrial (MECS, de l'anglès *Manufacturing Energy Consumption Survey*). En aquest sentit, i pensant en futures actualitzacions de l'UBEM d'Escaldes-Engordany, seria de gran utilitat que es realitzessin enquestes, almenys en els sectors residencial i comercial, de forma periòdica ja sigui a escala parroquial o nacional. Cal tenir present que tot i ser un dels mètodes més utilitzats per la recopilació de dades, les respostes dels enquestats no sempre són fiables atès el desconeixement generalitzat de la població sobre els aspectes que influeixen al comportament energètic de les llars, d'aquí la importància de fer actualitzacions periòdiques.

Els **resultats de l'anàlisi de discriminant lineal (LDA)** destinat a identificar el combustible utilitzat per calefacció en els diferents edificis de la parròquia són també una eina de gran utilitat en la planificació energètica regional i nacional. En l'actualitat, una de les apostes del Principat d'Andorra en la lluita contra el canvi climàtic és la implementació de xarxes de calor alimentades generalment a través de sistemes de cogeneració amb l'objectiu de suplir bona part de les calefaccions de fuel domèstic existents. Conèixer les principals fonts d'energia utilitzades per la climatització dels edificis permet un millor disseny i planificació d'aquestes xarxes.

Per últim, però no menys important, una altra aportació resultant del transcurs de la tesi és el **fitxer climàtic**. Com s'ha exposat en el Capítol 2, Andorra no disposa de fitxers TMY propis i, habitualment, quan s'ha requerit d'aquest tipus de dada, s'han utilitzat fitxers de zones dels països veïns amb característiques similars a les del Principat. El fitxer generat per l'UBEM d'Escaldes-Engordany permet disposar d'informació climàtica específica de la parròquia. Addicionalment, l'*script* utilitzat per la seva generació s'ha posat a disposició pública^{6.3} per tal de poder ser utilitzat a qualsevol altre indret del país.

6.3 Línies de desenvolupament futur

A continuació s'enumeren les línies d'estudi a tenir en consideració amb l'objectiu d'incrementar la fiabilitat i la capacitat dels UBEM com a eina de suport en la presa de decisions polítiques en el sector de l'edificació:

^{6.3} <https://github.com/andorra-ri/energiand>

- Explorar l'aplicació d'altres algoritmes de clúster, així com estudiar la implementació d'altres variables a part de les dades de consum energètic en la fragmentació dels UBEM per avaluar tot el potencial d'aquest mètode de *machine learning*.
- Aplicar mètodes de calibratge conjuntament a la fragmentació proposada per determinar si aquest presenta millors resultats que quan s'aplica en fragmentacions deterministes atès la major homogeneïtat dels grups d'edificis resultants.

A més de les línies de treball futur en el camp d'estudi dels UBEM, a continuació s'enumeren les línies d'estudi a tenir en consideració amb l'objectiu d'incrementar la fiabilitat i la capacitat de l'UBEM d'Escaldes-Engordany:

- Utilitzar dades horàries d'ús d'energia mesurades provinents de *smart meters* en l'anàlisi de clúster de la fragmentació així com en l'estimació de la bondat d'ajust dels UBEM. Les dades d'ús d'energia mesurades utilitzades en l'UBEM d'Escaldes-Engordany proporcionades per FEDA corresponen a dades mensuals recopilades manualment mitjançant inspeccions *in-situ* pels tècnics de la companyia. Aquest procés comporta que les dades d'ús d'energia mesurades no sempre corresponguin al primer i darrer dia de mes, sinó que la dada es pot haver recopilat en diferents dies tergiversant tant els resultats de l'anàlisi de clúster, i conseqüentment els de la fragmentació, així com els de la bondat d'ajust del model. En aquest sentit, l'ús de dades horàries enlloc de mensuals en la fragmentació suposaria una millora important de l'enfocament proposat ja que permetria segmentar amb més precisió consums similars.
- Recopilar dades de consum energètic de fuel domèstic. Com s'ha vist en el Capítol 4, el fuel domèstic és la font d'energia predominant a Escaldes-Engordany, i també al Principat d'Andorra en general. La validació dels usos energètics utilitzant aquesta font d'energia és doncs essencial per poder estimar la bondat d'ajust total de l'UBEM d'Escaldes-Engordany. Val a dir que, l'obtenció d'aquestes dades és en l'actualitat molt complexa ja que les companyies subministradores de fuel domèstic tant sols disposen d'informació sobre els litres de gasoil subministrats als edificis però no del consum d'aquest, fet que dificultaria la fase de validació.
- Definir valors característics del Principat d'Andorra. Com s'ha detallat en la fase de caracterització, algunes de les dades utilitzades per definir les propietats no-geomètriques dels edificis que componen l'UBEM d'Escaldes-Engordany s'han utilitzat

i adaptat de dades extretes d'altres treballs realitzats en els països veïns com és el cas de les propietats d'alguns elements de l'embolcall exterior de l'edifici o les infiltracions, i en alguns casos s'han assumit dades molt generals com en el cas del WWR de les finestres. En aquest sentit, i amb l'objectiu d'aconseguir reduir al mínim els desajustos dels resultats dels UBEM, la realització d'estudis específics dirigits a l'obtenció d'aquestes dades en edificis situats al Principat d'Andorra són essencials. Val a dir que molts dels paràmetres d'entrada necessaris per a la implementació d'UBEM es poden trobar en els ajuntaments ja que són informacions contingudes en els projectes tècnics entregats a l'hora de realitzar intervencions en els edificis, ja sigui obra nova o rehabilitació. Algunes de les dades que es podrien extraure i utilitzar per completar les dades contingudes en el cadastre són el WWR, informació sobre el tancaments, tant originals com posteriors en el cas de les rehabilitacions, o dades sobre els sistemes energètics instal·lats. Malauradament, la lenta digitalització dels tràmits de les institucions públiques que encara a dia d'avui sol·liciten la documentació en paper, fan que aquesta informació no es pugui explorar al màxim.

- Ampliar l'anàlisi a la totalitat del parc edificat d'Escaldes-Engordany. L'UBEM generat per la present tesi doctoral s'ha centrat exclusivament en els edificis d'ús residencial ja que són els que ocupen la gran majoria de la superfície construïda de les ciutats. L'ampliació d'aquest a la resta del parc edificat de la parròquia permetria també explorar el potencial de reducció energètica dels edificis amb ús comercial. Val a dir que aquesta ampliació implicaria tot un repte no només pel fet d'haver de simular més edificis, sinó que perquè la informació relacionada amb els aspectes energètics dels edificis comercials és molt més diversa que en el cas dels edificis residencials. La recopilació d'aquesta requerirà de la realització d'una altra enquesta energètica específica dels edificis comercials.

6.4 Referències

- BOPA 21/2018. (2018). Llei 21/2018, del 13 de setembre, d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic (Litecc).
- Travesset-Baro, O. (2017). Prospectiva energètica al Principat d'Andorra: model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista [Universitat Politècnica de Catalunya].



















ANNEX A GLOSSARI D'ACRÒNIMS




















ACDA	Atles Climàtic d'Andorra
ACS	Aigua Calenta Sanitària
ARI	Andorra Recerca + Innovació
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning</i>
BEM	<i>Building Energy Models</i>
BOPA	Butlletí Oficial del Principat d'Andorra
BPIE	<i>Building Performance Institute Europe</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CBECS	<i>Commercial Buildings Energy Consumption Survey</i>
CEA	<i>City Energy Analyst</i>
CityBES	<i>City Building Energy Saver</i>
COAA	Col·legi Oficial d'Arquitectes d'Andorra
COP	<i>Coefficient of Performace</i>
CV _{RMSE}	Coefficient de variació de l'error quadràtic mitjà
DOE	<i>U.S. Departament of Energy's</i>
ECEER	Enquesta del Consum Energètic dels Edificis Residencials
EEUU	Estats Units
EIA	<i>U.S. Energy Information Agency</i>
Energy ADE	<i>Energy Application Domain Extension</i>
FEDA	Forces Elèctriques d'Andorra
GBPN	<i>Global Building Performance Network</i>
GEH	Gasos d'efecte hivernacle
GTIII AR6	<i>Working Group III sixth Assessment Report</i>
GUID	<i>Globally Unique Identifier</i>
ICAEN	Institut Català de l'Energia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IQR	<i>Interquartile Range</i>
LDA	<i>Linear Discriminant Analysis</i>
LED	<i>Light-emitting diode</i>
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
Litecc	Llei d'impuls de la transició energètica i del canvi climàtic
LoD	<i>Level of Detail</i>
MAE	Error absolut mitjà
MAPE	Error mitjà percentual absolut
MDE	Model Digital d'Elevacions
MDS	Model Digital de Superfícies
MDT	Model Digital del Terreny
MECS	<i>Manufacturing Energy Consumption Survey</i>
NMBE	Error mitjà normalitzat de biaix
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NURBS	<i>Non-uniform rational B-spline</i>
OECC	Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic
OpenIDEAS	<i>Open Integrated District Energy Assessment by Simulation</i>
R2	Coefficient de determinació
RECS	<i>Residential Energy Consumption Survey</i>
RMSE	Error quadràtic mitjà
SaAS	Sabaté Associats. Arquitectura i Sostenibilitat


SIG	Sistema d'Informació Geogràfica
SUNtool	<i>Sustainable Urban Neighbourhood</i>
TEASER	<i>Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit</i>
TIC	Tecnologies de la Informació i Comunicació
TMM	<i>Typical Meteorological Months</i>
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
UBEM	<i>Urban Building Energy Model</i>
UE	Unió Europea
umi	<i>Urban Modelling Interface</i>
URBANopt	<i>Urban Renewable Building and Neighborhood Optimization</i>
USEM	<i>Urban System Energy Model</i>
UWG	<i>Urban Weather Generator</i>
WWR	<i>Window-to-wall ratio</i>

ANNEX B CÀLCUL DELS WWR

La Taula B.1 mostra els WWR calculats per cadascuna de les façanes analitzades del parc edificat d'Escaldes-Engordany.




Període A					
Edifici 1		Edifici 2		Edifici 3	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	26,11		69,84		59,17
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	9,89		22,37		9,14
WWR	WWR	WWR			
19%	32%	15%			
Edifici 4		Edifici 5		Edifici 6	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	22,07		13,74		12,22
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	3,84		2,69		2,64
WWR	WWR	WWR			
17%	20%	22%			
Edifici 7		Edifici 8		Edifici 9	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	13,57		34,01		9,28
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	0,82		12,24		1,5
WWR	WWR	WWR			
6%	36%	16%			
Edifici 10		Edifici 11		Edifici 12	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	3,57		33,47		8,31
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	0,83		7,86		1,30
WWR	WWR	WWR			
23%	23%	16%			
Edifici 13		Edifici 14		Edifici 15	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	9,17		9,36		2,57
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	0,99		2,14		0,47
WWR	WWR	WWR			
11%	15%	18%			
Edifici 16		Edifici 17		Edifici 18	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	10,74		14,77		23,07
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	0,97		3,89		4,21
WWR	WWR	WWR			
9%	26%	18%			

Edifici 19		Edifici 20		Edifici 21	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	10,62		11,92		22,96
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	2,75		2,56		4,10
	WWR		WWR		WWR
	26%		21%		18%
Edifici 22		Edifici 23		Edifici 24	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	4,76		24,29		9,20
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	1,03		8,91		1,58
	WWR		WWR		WWR
	22%		37%		17%
Edifici 25					
	Dim. façana				
	16,79				
	Dim. finestres				
	3,35				
	WWR				
	20%				
Període B					
Edifici 1		Edifici 2		Edifici 3	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	31,27		11,48		35,21
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	6,84		1,75		14,64
	WWR		WWR		WWR
	22%		15%		42%
Edifici 4		Edifici 5		Edifici 6	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	23,06		10,53		9,50
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	4,12		2,34		1,74
	WWR		WWR		WWR
	18%		22%		18%
Edifici 7		Edifici 8		Edifici 9	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	24,22		12,86		17,58
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	5,28		3,34		7,66
	WWR		WWR		WWR
	22%		26%		44%
Edifici 10		Edifici 11		Edifici 12	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	50,36		11,89		18,57
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	9,60		3,69		4,86
	WWR		WWR		WWR
	19%		31%		26%

Edifici 13		Edifici 14		Edifici 15	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	6,67		36,42		14,52
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	1,44		12,58		4,29
	WWR		WWR		WWR
	22%		35%		30%
Edifici 16		Edifici 17		Edifici 18	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	16,30		13,91		6,83
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	5,72		5,45		0,95
	WWR		WWR		WWR
	35%		39%		14%
Edifici 19		Edifici 20		Edifici 21	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	50,88		9,71		19,34
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	4,56		2,03		3,74
	WWR		WWR		WWR
	9%		21%		19%
Edifici 22		Edifici 23			
	Dim. façana		Dim. façana		
	20,23		48,80		
	Dim. finestres		Dim. finestres		
	3,61		17,54		
	WWR		WWR		
	18%		36%		
Període C					
Edifici 1		Edifici 2		Edifici 3	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	36,47		7,77		7,49
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	13,43		1,91		2,17
	WWR		WWR		WWR
	37%		25%		29%
Edifici 4		Edifici 5		Edifici 6	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	19,96		7,00		22,19
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	2,59		1,32		4,71
	WWR		WWR		WWR
	13%		19%		21%
Edifici 7		Edifici 8		Edifici 9	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	29,94		17,36		23,35
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	6,78		4,87		6,70
	WWR		WWR		WWR
	23%		28%		29%

Edifici 10		Edifici 11		Edifici 12	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	7,53		11,98		10,89
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	2,86		3,98		3,87
	WWR		WWR		WWR
	38%		33%		36%
Edifici 13		Edifici 14		Edifici 15	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	6,36		14,16		7,77
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	1,77		6,21		2,34
	WWR		WWR		WWR
	28%		44%		30%
Edifici 16		Edifici 17		Edifici 18	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	9,03		26,57		5,33
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	3,90		4,89		1,53
	WWR		WWR		WWR
	43%		18%		29%
Edifici 19					
	Dim. façana				
	6,92				
	Dim. finestres				
	1,16				
	WWR				
	17%				
Període D					
Edifici 1		Edifici 2		Edifici 3	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	15,72		17,71		6,29
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	3,17		4,67		1,58
	WWR		WWR		WWR
	20%		26%		25%
Edifici 4		Edifici 5		Edifici 6	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	1,29		4,22		11,34
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	0,30		0,66		1,74
	WWR		WWR		WWR
	23%		16%		15%
Edifici 7		Edifici 8		Edifici 9	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	11,30		21,86		14,09
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	2,30		5,19		2,07
	WWR		WWR		WWR
	20%		24%		15%

Edifici 10		Edifici 11		Edifici 12	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	7,70		8,30		37,67
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	2,53		2,58		8,16
	WWR		WWR		WWR
	33%		31%		22%
Edifici 13		Edifici 14		Edifici 15	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	18,22		13,63		20,96
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	1,94		5,20		6,48
	WWR		WWR		WWR
	11%		38%		31%
Edifici 16		Edifici 17		Edifici 18	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	14,68		15,94		25,60
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	2,07		2,42		5,60
	WWR		WWR		WWR
	14%		15%		22%
Edifici 19		Edifici 20		Edifici 21	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	2,25		12,76		9,05
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	0,66		3,16		2,42
	WWR		WWR		WWR
	29%		25%		27%
Edifici 22		Edifici 23		Edifici 24	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	13,85		18,24		3,91
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	2,66		4,21		1,00
	WWR		WWR		WWR
	19%		23%		25%
Edifici 25		Edifici 26		Edifici 27	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	8,71		24,42		5,33
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	1,43		4,42		1,20
	WWR		WWR		WWR
	16%		18%		22%
Edifici 28					
	Dim. façana				
	12,47				
	Dim. finestres				
	3,14				
	WWR				
	25%				

Període E					
Edifici 1		Edifici 2		Edifici 3	
	Dim. façana		Dim. façana		Dim. façana
	5,52		4,44		10,15
	Dim. finestres		Dim. finestres		Dim. finestres
	2,60		0,96		1,13
	WWR		WWR		WWR
	47%		22%		11%

Taula B.1. Dimensions de façana, finestres i valor del WWR de les façanes analitzades en el parc edificat d'Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

ANNEX C ENQUESTA ENERGÈTICA

L'enquesta energètica desenvolupada per recopilar les dades sobre el parc edificat necessàries per a la implementació de l'UBEM d'Escaldes-Engordany està disponible en el següent enllaç:



<https://arcg.is/0Xamru>

ANNEX D CÀLCUL DE LES INFILTRACIONS

La Taula D.1 presenta els valors calculats de les infiltracions dels edificis en clima continental determinats per Poza-Casado (2021) tenint en compte el diferencial de pressió de 2,88 Pa considerat a Escaldes-Engordany.

Informació del habitatges de la mostra				Dades tests a 50Pa			ACH a 2,88 Pa	
Ciutat	Any construcció	Període constructiu	Tipologia	V. aire (m ³)	V50 (m ³ /h)	C _{env} (m ³ /h·Pa)	n	ACH (h ⁻¹)
M	1890	A	Plurif.	200,15	1019,8	13,6	0,647	0,13
M	1900	A	Plurif.	200,11	2094,5	149,5	0,678	1,53
M	1902	A	Plurif.	320,47	2157,5	225,2	0,582	1,30
M	1935	A	Plurif.	215,4	1046,6	113	0,575	0,96
M	1940	A	Plurif.	113,19	566,2	47,1	0,639	0,82
M	1949	A	Plurif.	125,76	890	90,5	0,59	1,34
M	1950	A	Plurif.	190,19	224,3	17,3	0,658	0,18
M	1950	A	Plurif.	178,66	607,7	49,2	0,648	0,55
M	1950	A	Plurif.	208,28	696	59,7	0,632	0,56
V	1950	A	Plurif.	202,17	528,8	42,1	0,65	0,41
V	1950	A	Plurif.	174,72	550,6	40,1	0,673	0,47
M	1954	A	Plurif.	220,36	1053,7	112,6	0,576	0,94
M	1955	A	Plurif.	215,86	634,1	57,1	0,621	0,51
M	1955	A	Plurif.	117,47	1114,4	104,8	0,613	1,71
M	1956	B	Plurif.	167,22	555,7	50,8	0,618	0,58
M	1960	B	Plurif.	415,6	5140,8	467,4	0,621	2,17
M	1963	B	Plurif.	181,62	1004,5	99	0,598	1,03
M	1967	B	Plurif.	158,75	911	92,9	0,589	1,09
V	1968	B	Plurif.	310,77	1668,3	198,6	0,548	1,14
V	1968	B	Plurif.	161,2	602,5	60,7	0,592	0,70
V	1968	B	Plurif.	152,4	662,1	48,7	0,67	0,65
M	1972	B	Plurif.	211,41	737,8	63,9	0,63	0,59
M	1975	B	Plurif.	224,32	2606,2	164,5	0,711	1,55
M	1977	B	Plurif.	241,68	1378,1	133,5	0,603	1,04
M	1980	B	Plurif.	378,87	2174,6	197,2	0,619	1,00
M	1980	B	Plurif.	221,39	1033	95,2	0,619	0,83
V	1980	B	Plurif.	218,46	1004,4	75,1	0,668	0,70
V	1980	B	Plurif.	175,68	452,2	34,1	0,664	0,39
V	1980	B	Plurif.	217,36	907,8	61,5	0,692	0,59
V	1980	B	Plurif.	274,54	2087,1	217,5	0,582	1,47
M	1981	C	Plurif.	199,72	1074,4	103,9	0,602	0,98
M	1981	C	Plurif.	186,31	534,3	48,7	0,616	0,50
M	1981	C	Plurif.	228,08	1064,3	105,4	0,596	0,87

M	1981	C	Plurif.	198,99	777,3	54,6	0,685	0,57
M	1982	C	Plurif.	166,27	867,8	74,2	0,634	0,87
M	1986	C	Plurif.	205,3	1584,1	151,5	0,606	1,40
M	1986	C	Plurif.	232,46	1428,4	126,5	0,624	1,05
M	1987	C	Plurif.	84,94	1273,8	98,1	0,661	2,32
V	1988	C	Plurif.	209,59	957,3	84,2	0,624	0,78
M	1990	C	Plurif.	254,16	1041,4	100,5	0,601	0,75
M	1990	C	Plurif.	281,48	2069	199,3	0,604	1,34
V	1990	C	Plurif.	240,44	709,6	43,2	0,72	0,38
V	1992	C	Plurif.	189,75	1243,6	134,8	0,571	1,30
M	1992	C	Plurif.	163,83	1213,9	123,4	0,59	1,41
M	1993	C	Plurif.	222	1223	111	0,617	0,96
M	1996	D	Plurif.	246,14	1499,2	158,1	0,582	1,19
M	1996	D	Plurif.	329,54	983,1	97	0,597	0,55
M	1996	D	Plurif.	307,7	2786,1	299,6	0,576	1,79
M	1997	D	Plurif.	89,26	1238,8	126,9	0,585	2,64
M	1998	D	Plurif.	258,84	1931	183,7	0,607	1,35
M	1998	D	Plurif.	179,26	1283,1	105,5	0,643	1,16
M	1998	D	Plurif.	192,44	1891,4	187,8	0,595	1,83
M	1999	D	Plurif.	99,88	1305,2	139,3	0,578	2,57
M	2001	D	Plurif.	223,91	1176,7	108,8	0,615	0,93
M	2001	D	Plurif.	155,09	1660,9	155,8	0,611	1,92
M	2001	D	Plurif.	392,16	1730,2	130,6	0,666	0,67
M	2002	D	Plurif.	171,18	1238,3	109	0,626	1,23
M	2002	D	Plurif.	176,93	1757,7	172,4	0,6	1,84
M	2002	D	Plurif.	220,2	842,9	94,6	0,563	0,78
M	2003	D	Plurif.	159,55	1545	162,8	0,582	1,89
M	2003	D	Plurif.	193,62	1865,4	203,4	0,574	1,93
M	2003	D	Plurif.	222,2	1753	151,8	0,632	1,33
M	2004	D	Plurif.	225,34	1351,6	128,4	0,605	1,08
M	2005	D	Plurif.	80,38	874,1	102,3	0,555	2,29
M	2005	D	Plurif.	181,7	1168	116,9	0,593	1,20
M	2006	D	Plurif.	278,46	1453	140,7	0,602	0,95
M	2006	D	Plurif.	281,34	3288,9	192,8	0,73	1,48
M	2006	D	Plurif.	281,34	2984	211,6	0,684	1,55
M	1960	B	Unif.	477,78	2590,6	256,9	0,597	1,01
M	1963	B	Unif.	413,02	2446,3	240,3	0,597	1,09
M	1974	B	Unif.	625,42	3247,9	277,1	0,633	0,87
M	1978	B	Unif.	552,78	4086,3	392,1	0,603	1,34
M	1980	C	Unif.	779,41	4009,9	388,9	0,603	0,94
M	1980	C	Unif.	261,38	944,5	89,1	0,606	0,65
M	1988	C	Unif.	435,84	2425,4	208,1	0,633	0,93
M	1986	C	Unif.	485,52	2086,6	166,3	0,649	0,68

M	1988	C	Unif.	435,84	2425,4	208,1	0,63	0,93
V	1991	C	Unif.	475,12	704,5	53,2	0,666	0,23
M	1991	D	Unif.	771,56	8999,4	1112,2	0,542	2,56
M	1997	D	Unif.	319,32	2053,5	172,7	0,638	1,06
M	1998	D	Unif.	719,48	719,48	186,7	0,616	0,50
M	2002	D	Unif.	530,53	9251	813,2	0,625	2,97
M	2003	D	Unif.	451,53	1488,9	155,5	0,584	0,64
M	2006	D	Unif.	330,66	3126,1	325,4	0,582	1,82
V	2007	D	Unif.	372,45	1608,8	113,6	0,683	0,63

Taula D.1. Càlcul dels valors d'infiltracions tenint en compte el diferencial de pressió calculat a Escaldes-Engordany

Font. Elaboració pròpia

ANNEX E RESPOSTES DE L'ENQUESTA ECEER

Les preguntes realitzades en l'enquesta ECEER així com les respostes associades es presenten a continuació:

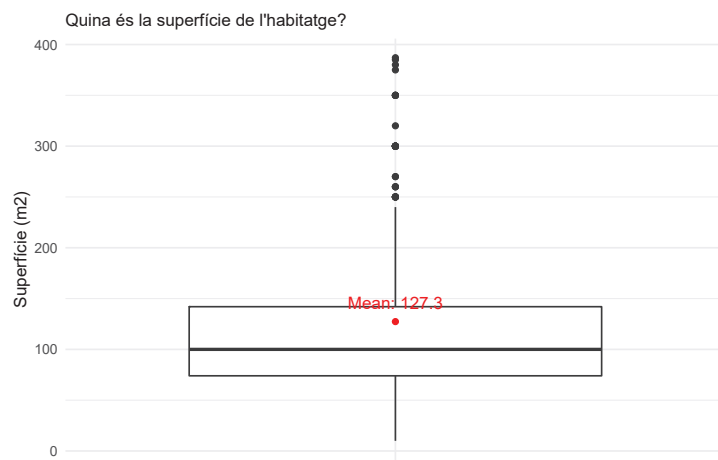
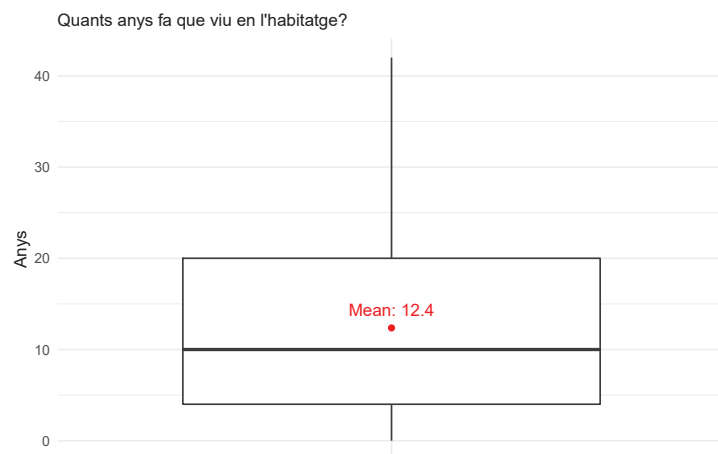
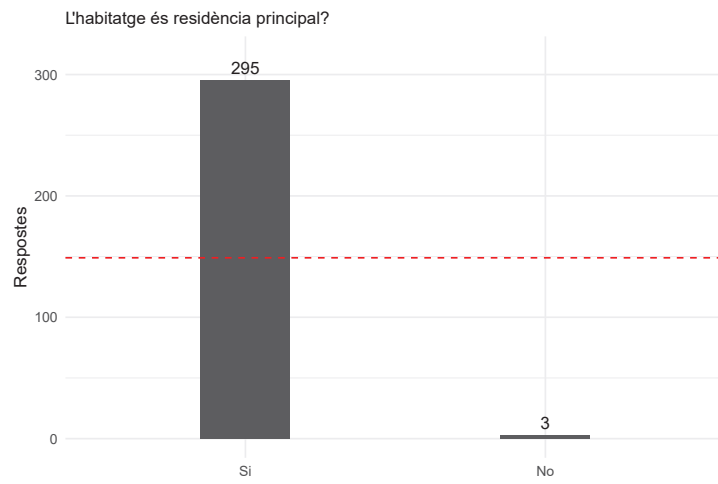
Resultats de l'Enquesta del Consum Energètic d'Edificis Residencials (ECEER)

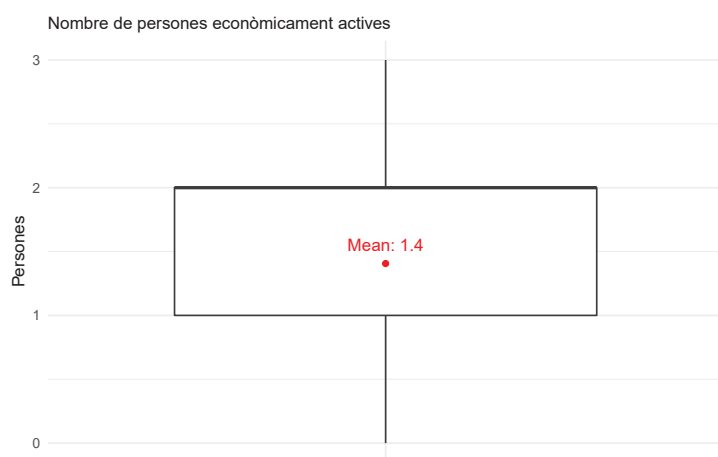
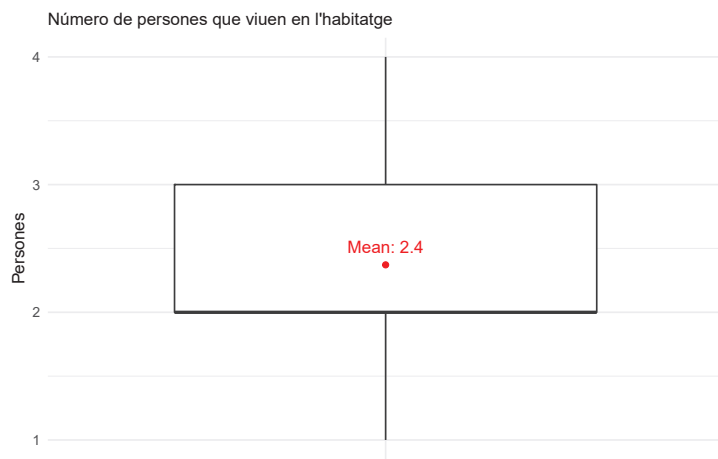
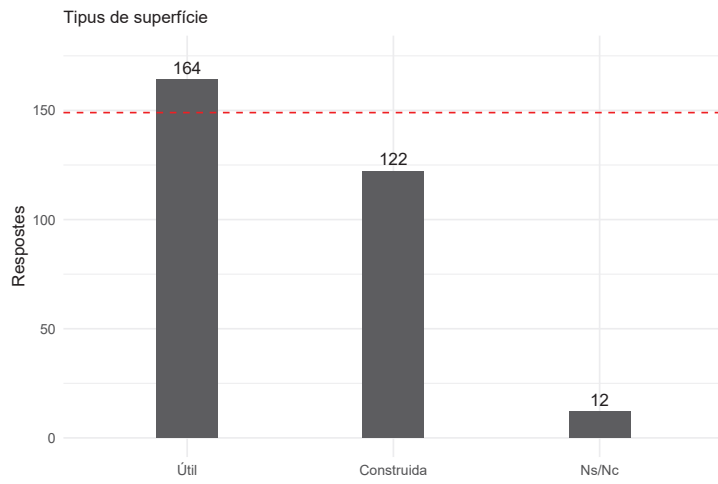
Contents

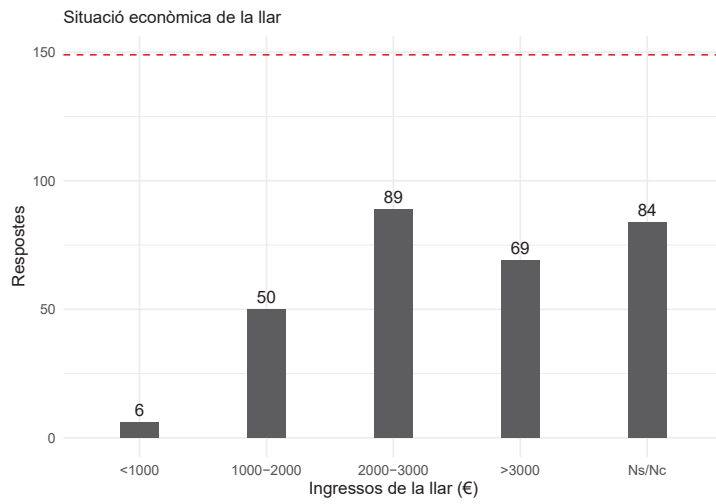
1 Dades generals de l'habitatge	3
2 Característiques generals de l'edifici	5
2.1 Finestres	5
2.2 Envoltant	6
2.3 Energies renovables	7
3 Sistema de calefacció de l'habitatge	8
3.1 Instal·lació de calefacció fixa	8
3.2 Instal·lació de calefacció puntual	10
3.3 Ús del sistema de calefacció	12
4 Sistema d'aigua calenta sanitària	13
4.1 Sistema d'aigua calenta sanitària independent	13
4.2 Sistema d'aigua calenta sanitària compartit amb el de calefacció	14
4.3 Ús del sistema d'aigua calenta sanitària	15
5 Sistema de Refrigeració	16
5.1 Instal·lació de refrigeració	16
5.2 Ús del sistema de refrigeració	17
6 Il·luminació	19
6.1 Tipus de làmpades	19
6.2 Ús de la il·luminació	20
7 Electrodomèstics	21
7.1 Cuina i Forn	21
7.1.1 Característiques de la cuina i forn presents en l'habitatge	21
7.1.2 Ús de la cuina i el forn	23
7.2 Frigorífic i congelador	25

7.2.1	Característiques del frigorífic i el congelador presents en l'habitatge	25
7.3	Rentadora i Assecadora	27
7.3.1	Característiques de la rentadora i l'assecadora presents en l'habitatge	27
7.3.2	Ús de la rentadora i assecadora	28
7.4	Rentavaixelles	30
7.4.1	Característiques del rentavaixelles presents en l'habitatge	30
7.4.2	Ús del rentavaixelles	31
8	Aparells electrònics	32
8.1	Televisor	32
8.1.1	Característiques del televisor presents en l'habitatge	32
8.1.2	Ús del televisor	34

1 Dades generals de l'habitatge

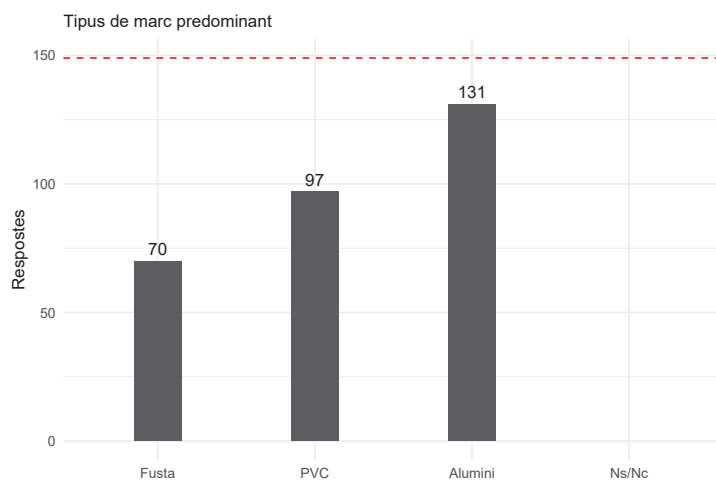


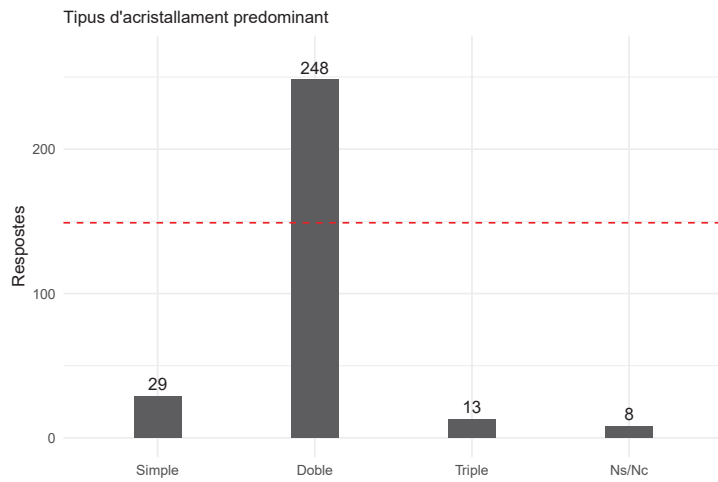




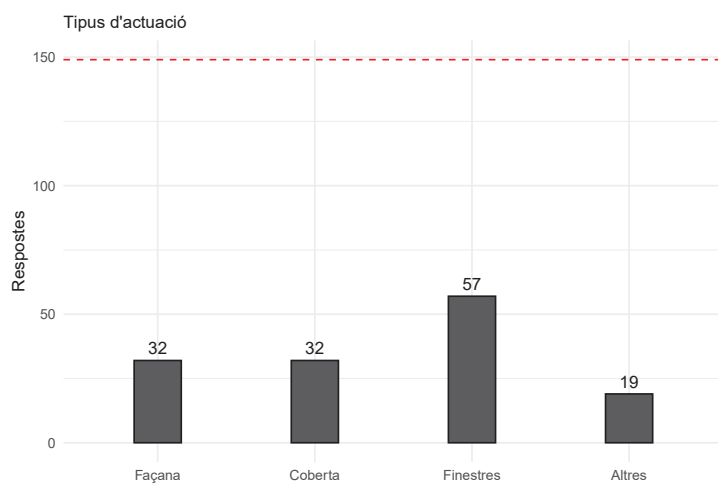
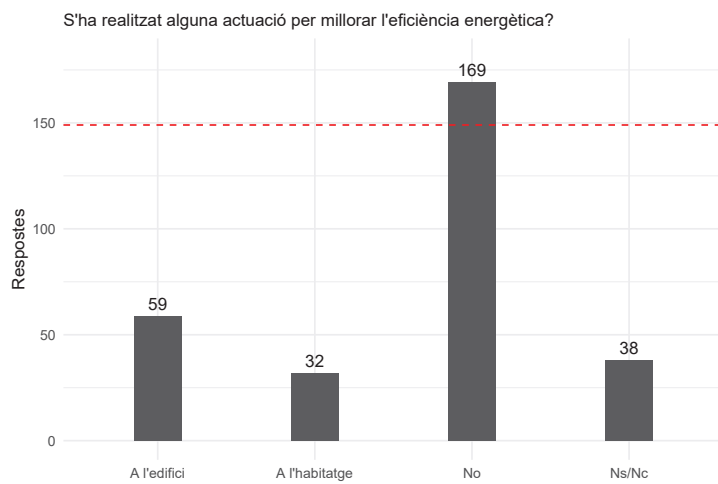
2 Característiques generals de l'edifici

2.1 Finestres

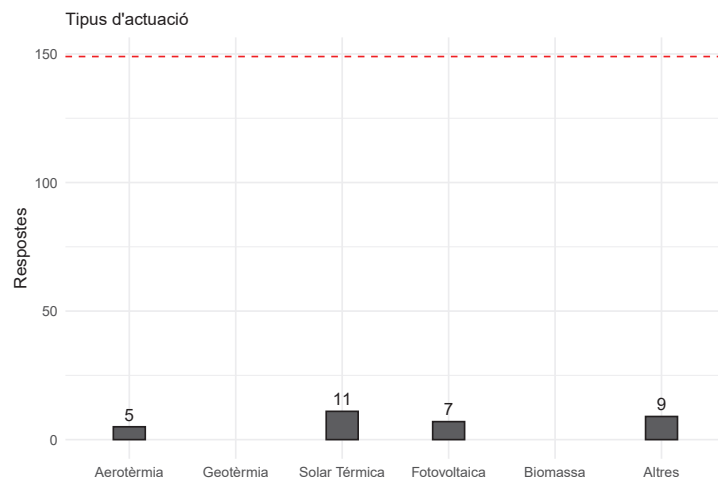
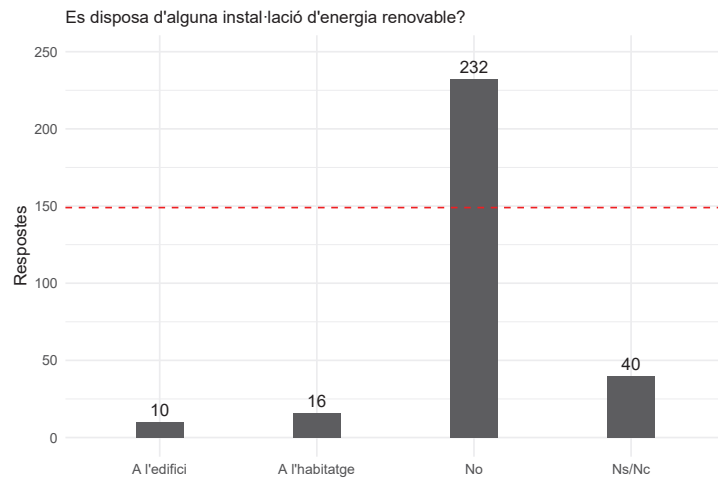




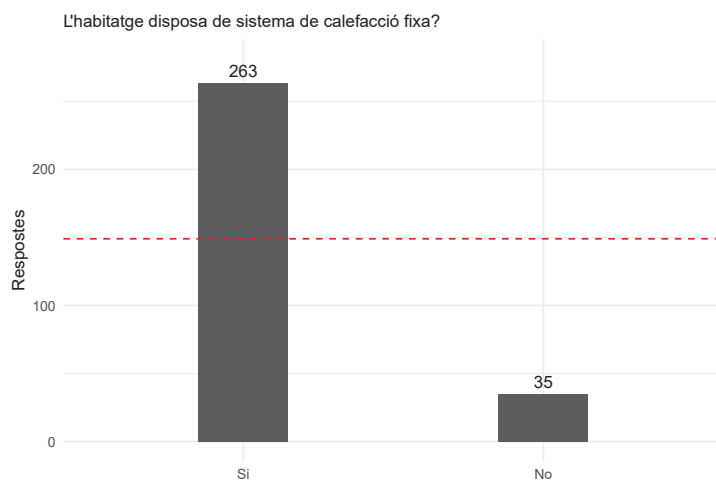
2.2 Envoltent



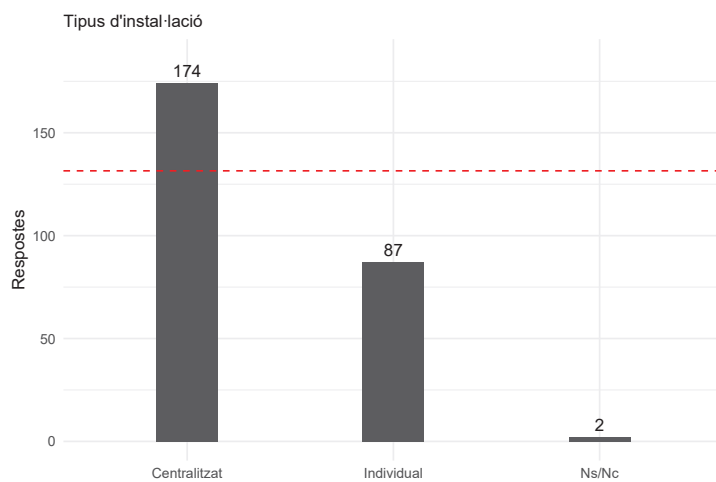
2.3 Energies renovables

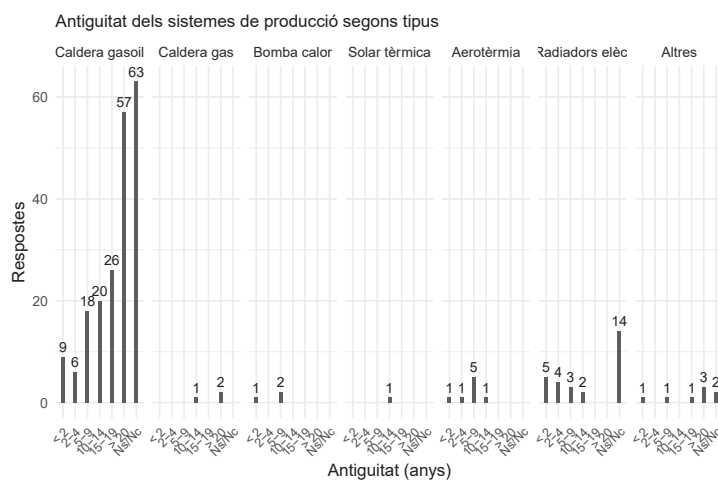
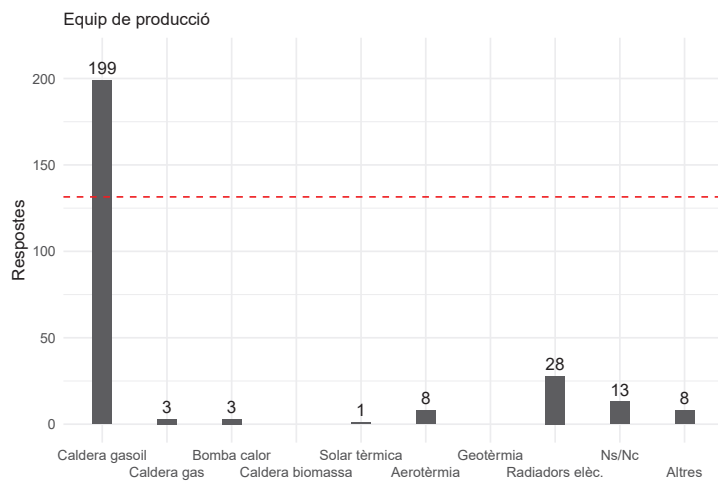
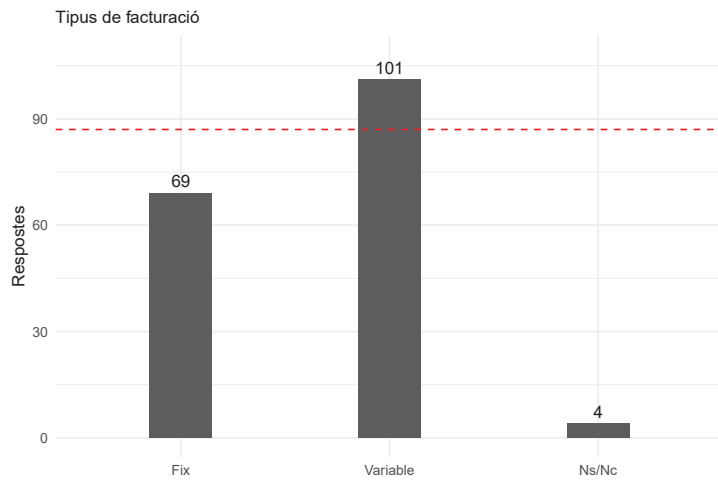


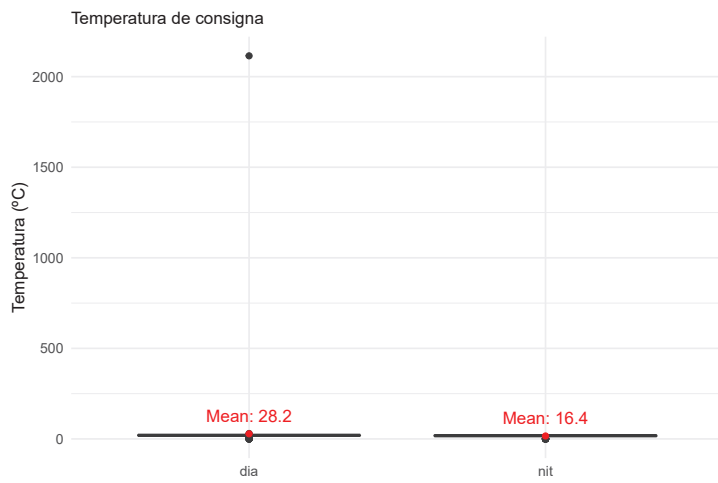
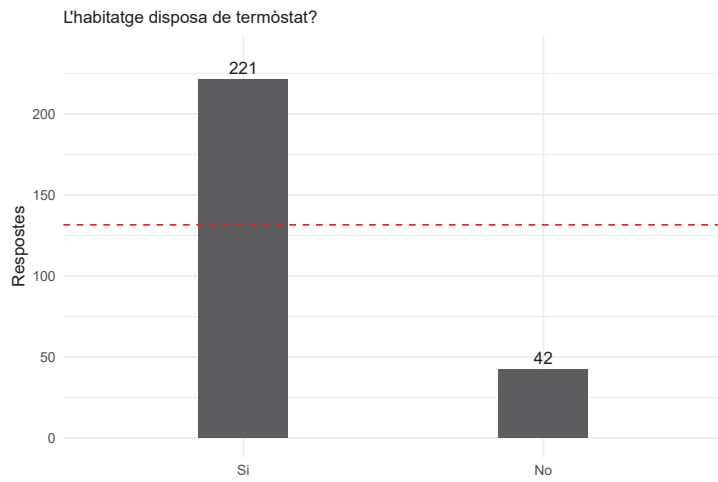
3 Sistema de calefacció de l'habitatge



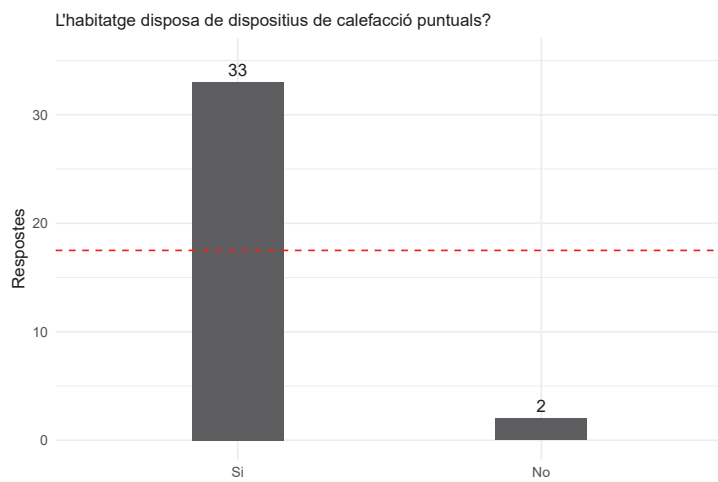
3.1 Instal·lació de calefacció fixa

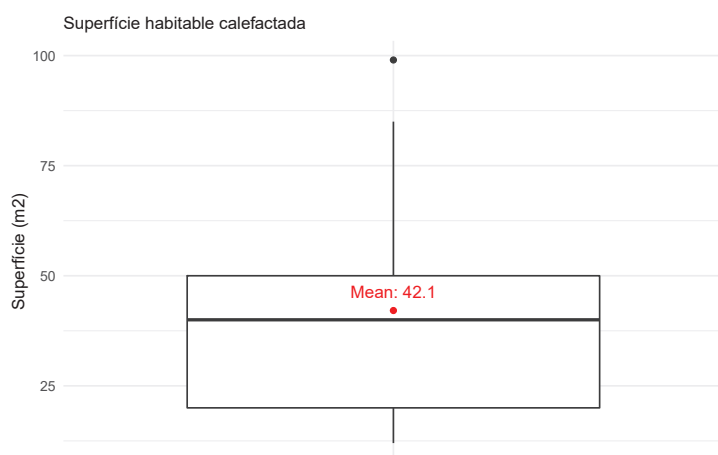
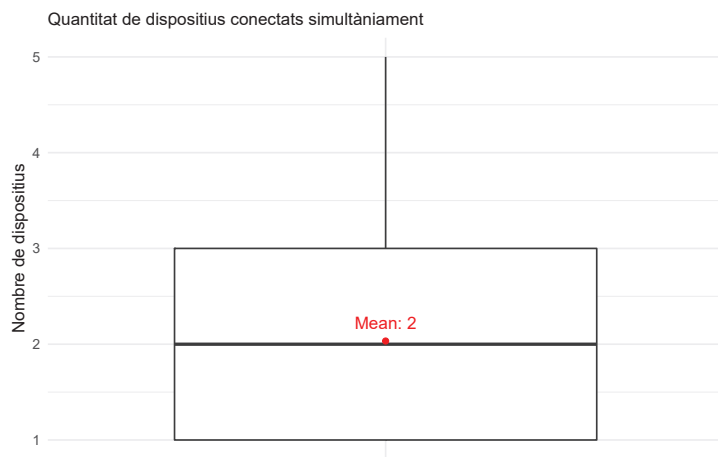
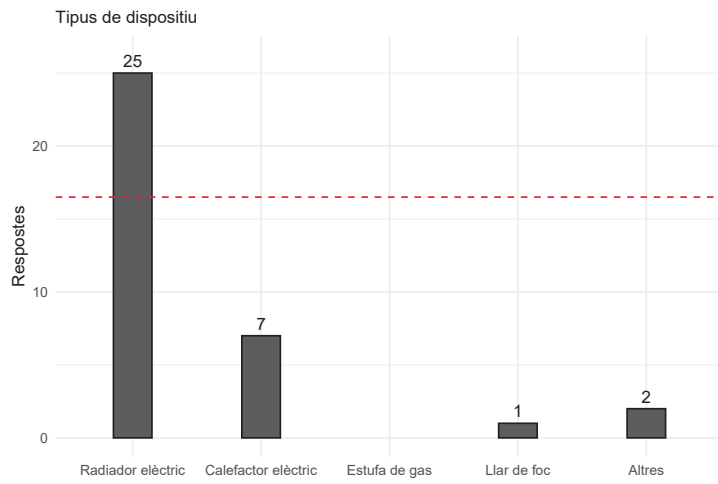




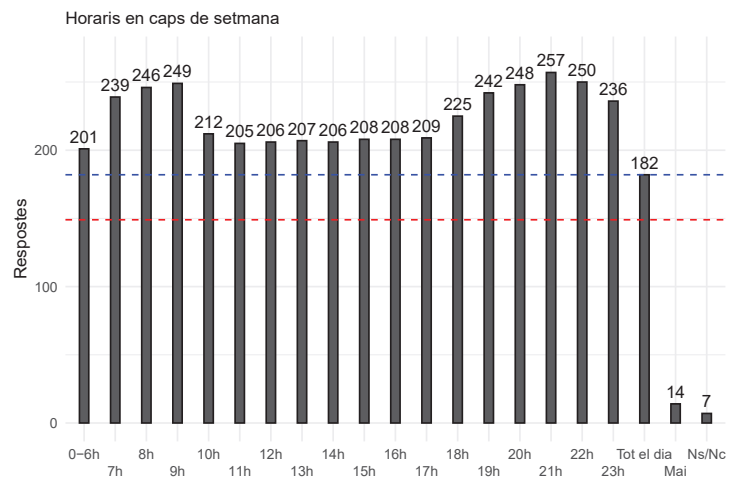
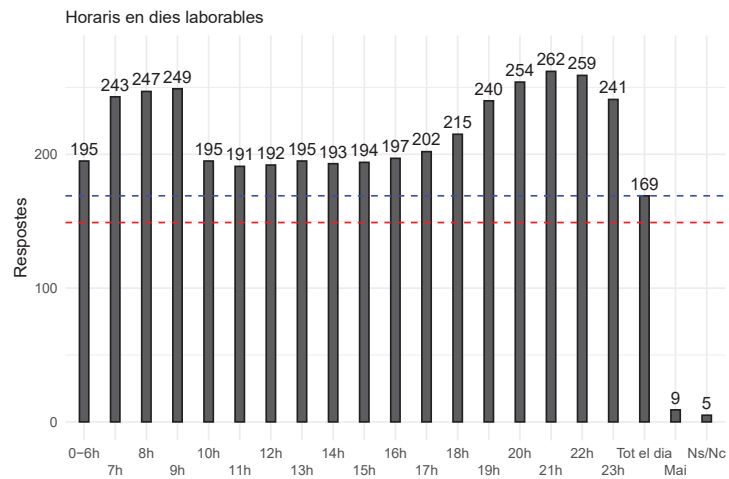
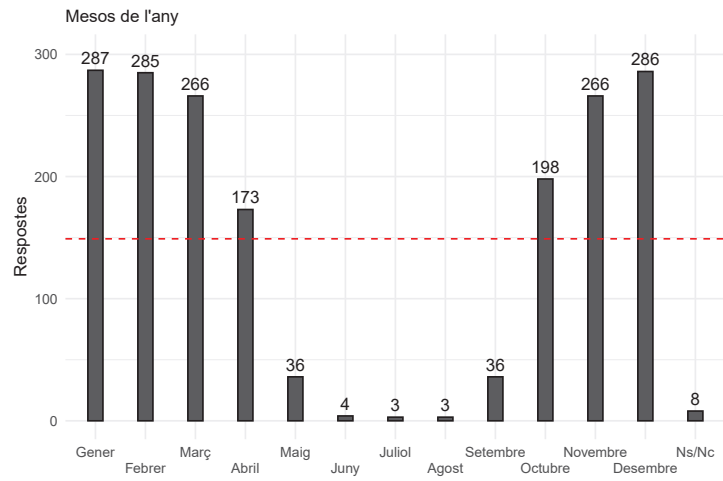


3.2 Instal·lació de calefacció puntual

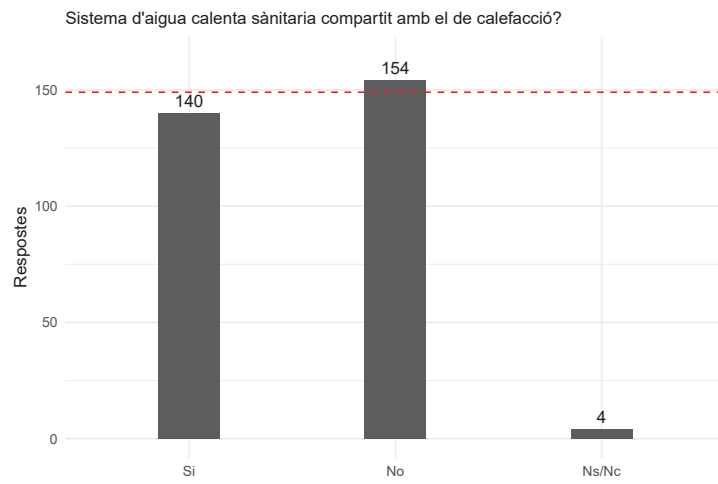




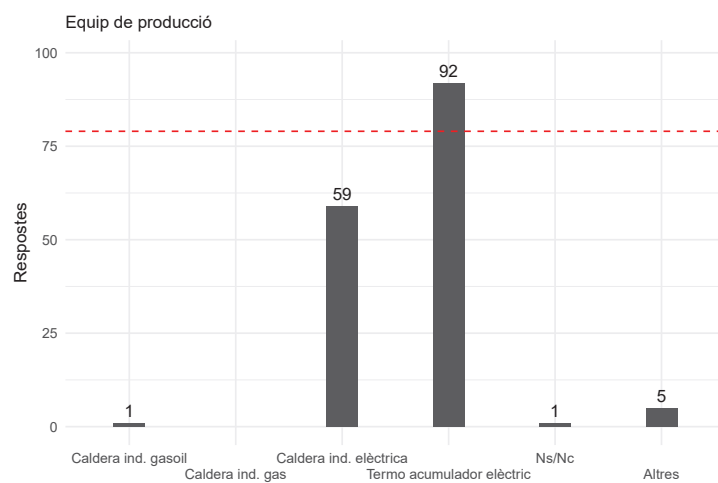
3.3 Ús del sistema de calefacció

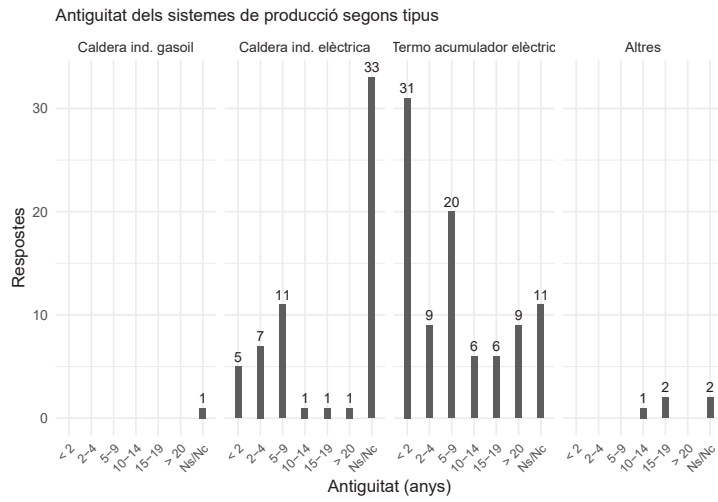


4 Sistema d'aigua calenta sanitàària

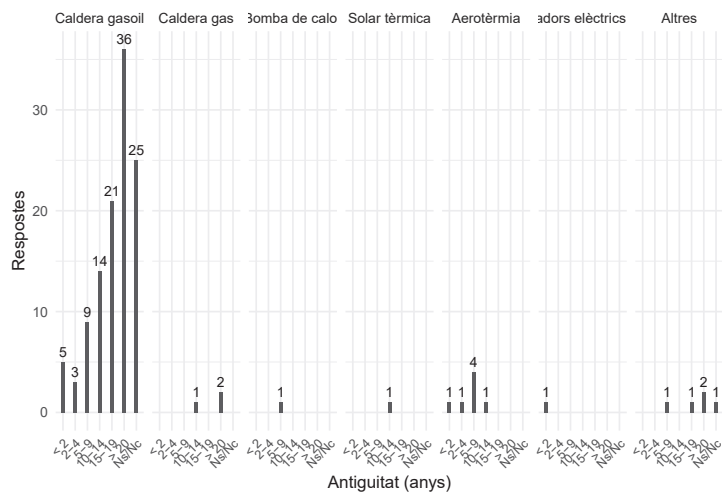
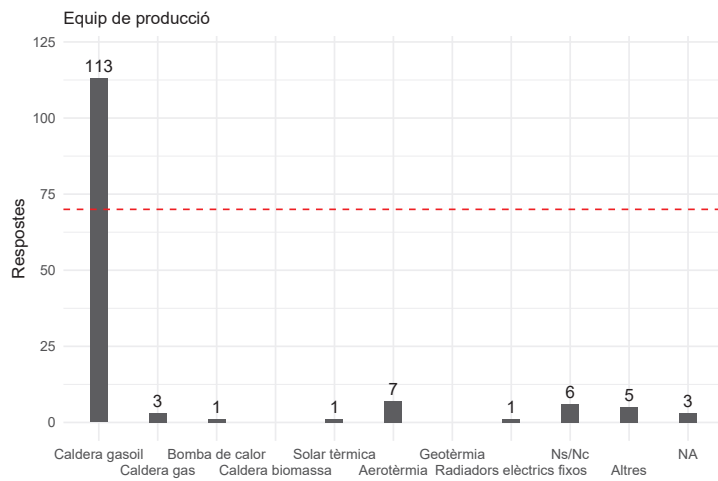


4.1 Sistema d'aigua calenta sanitàària independent

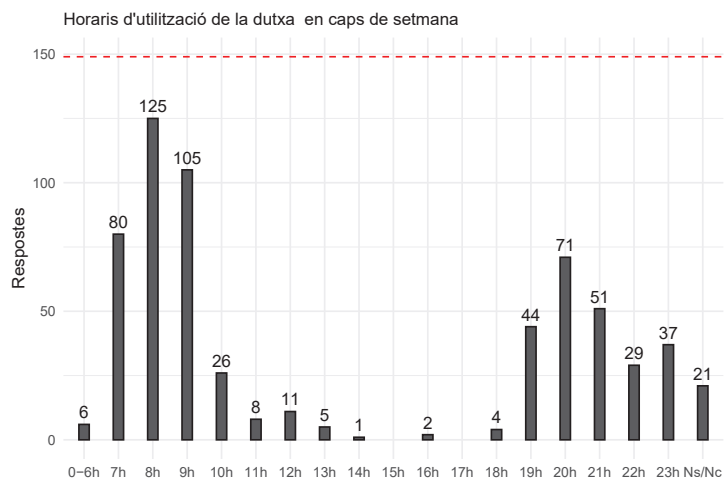
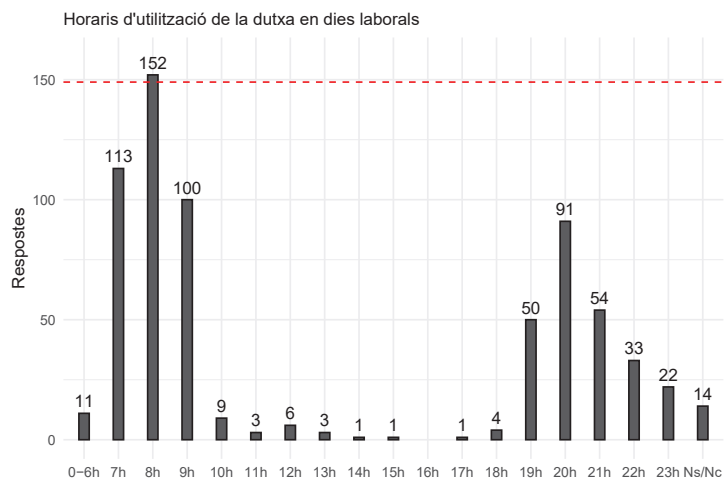
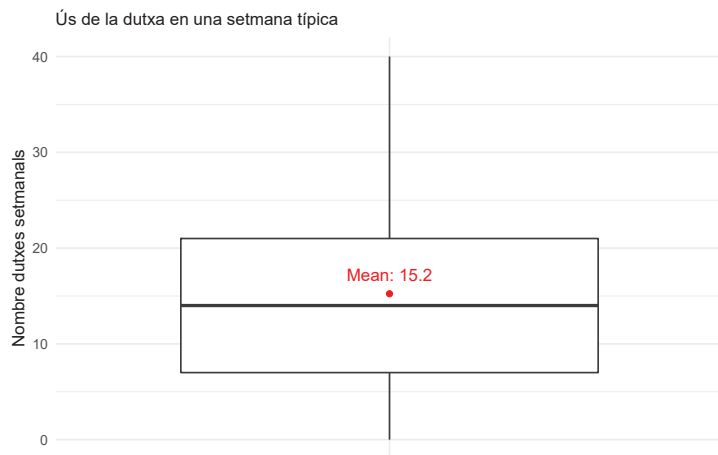




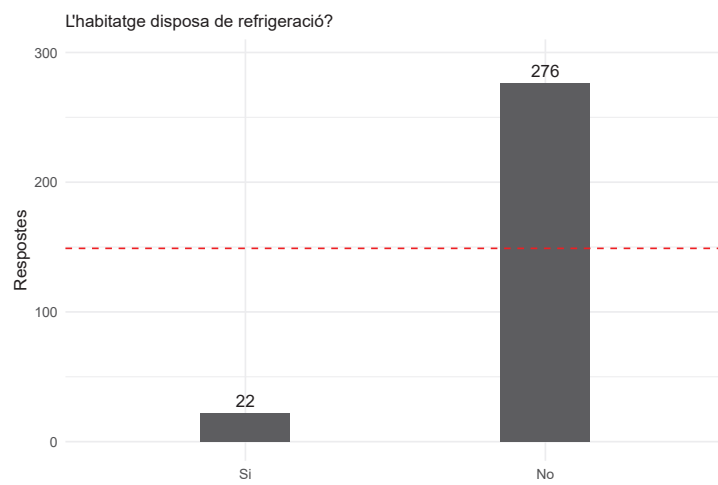
4.2 Sistema d'aigua calenta sanitària compartit amb el de calefacció



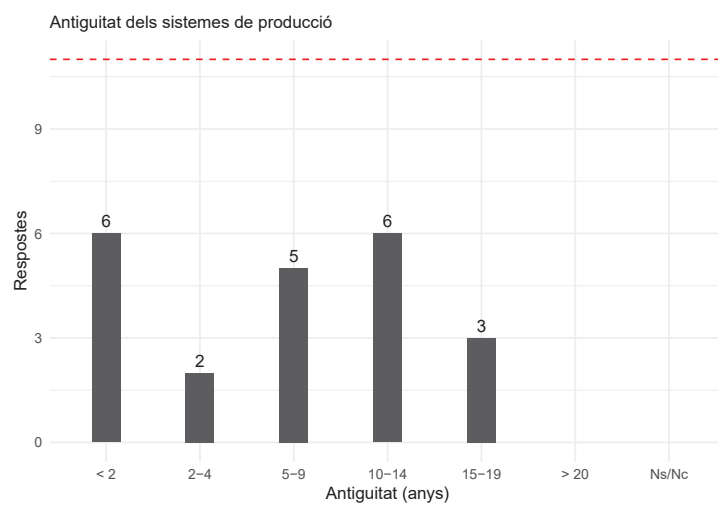
4.3 Ús del sistema d'aigua calenta sanitària

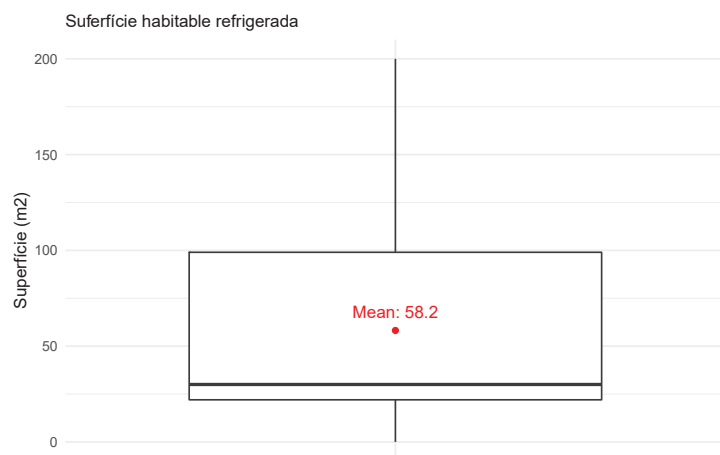
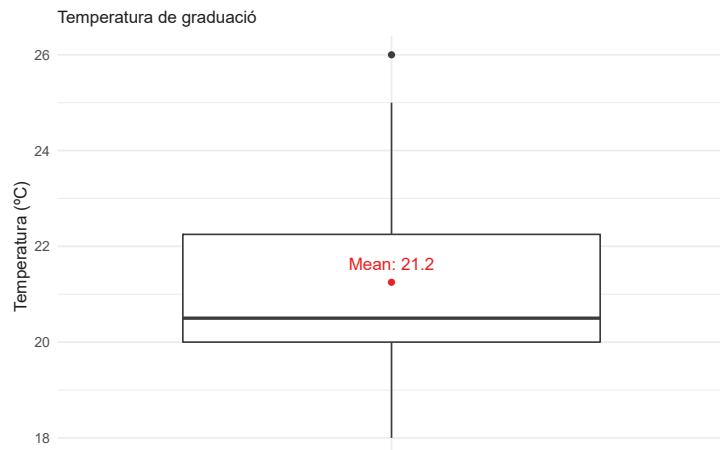


5 Sistema de Refrigeració

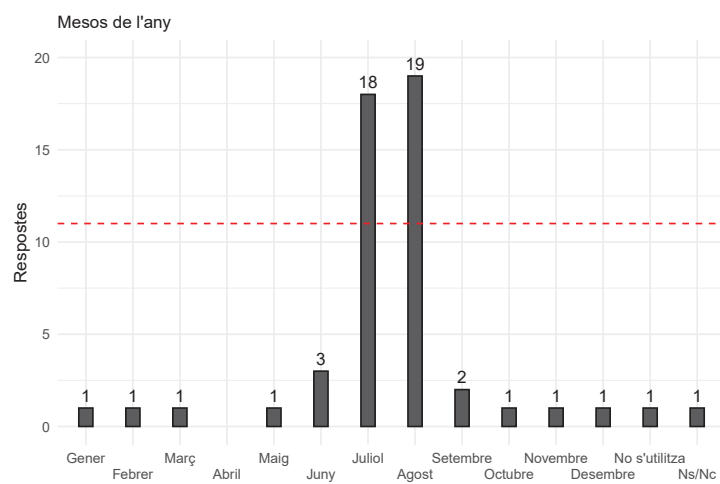


5.1 Instal·lació de refrigeració

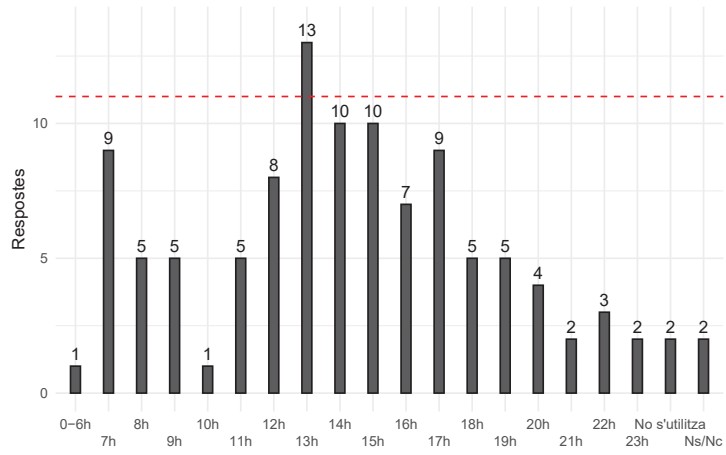




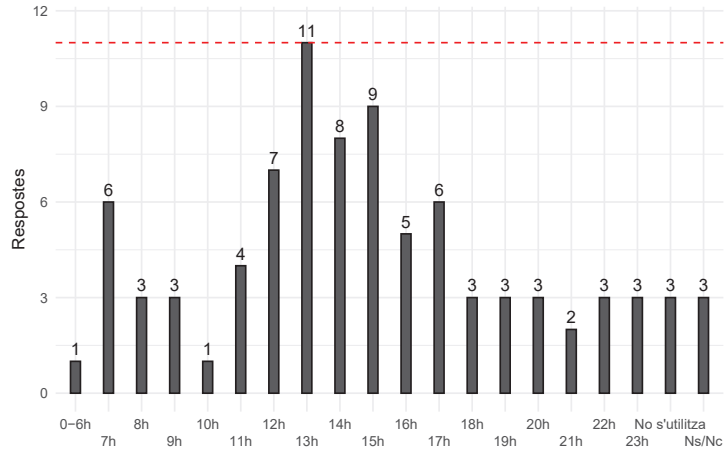
5.2 Ús del sistema de refrigeració



Horaris en dies laborables

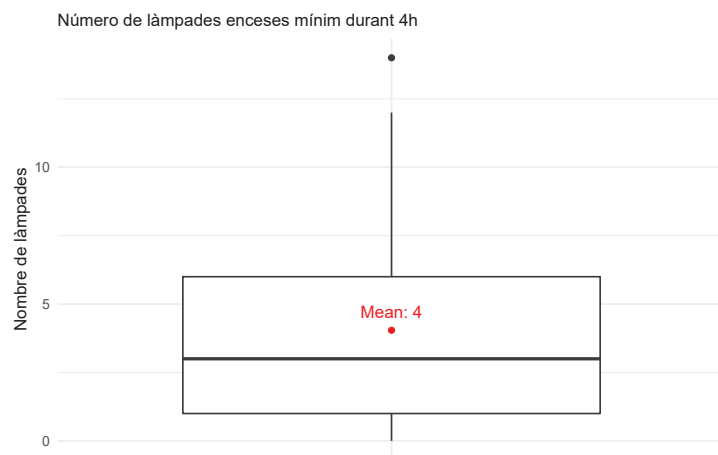
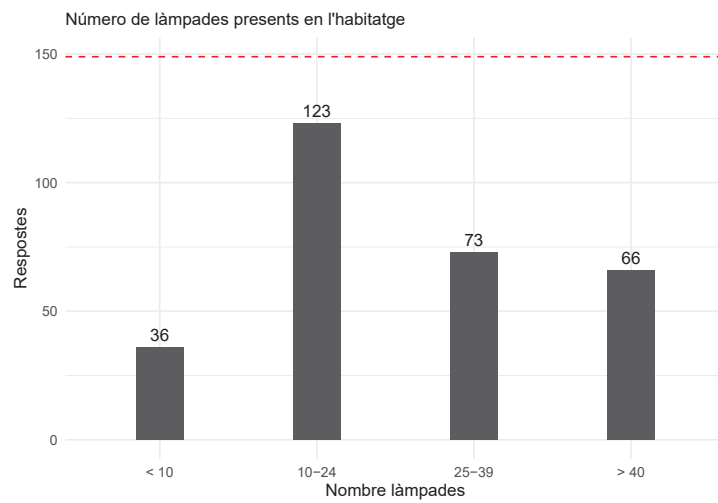


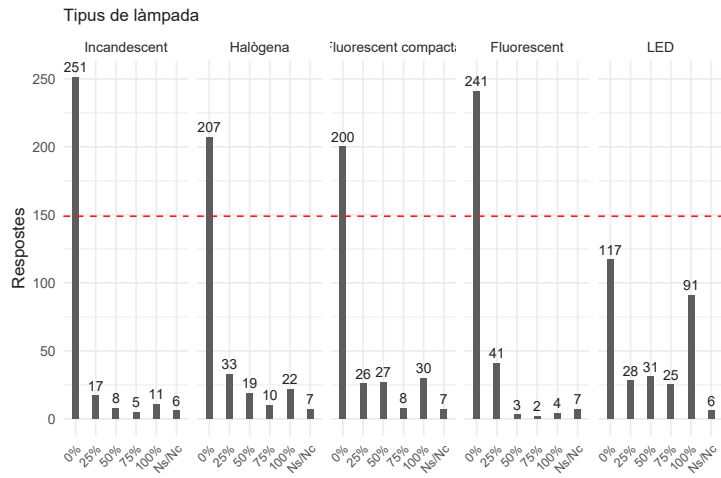
Horaris en caps de setmana



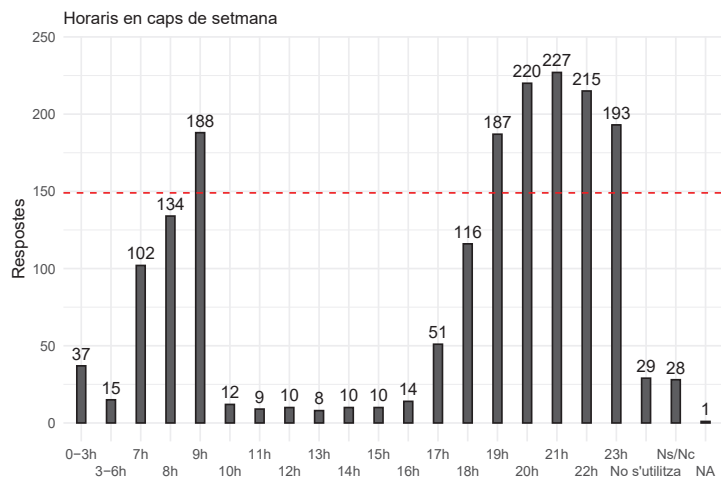
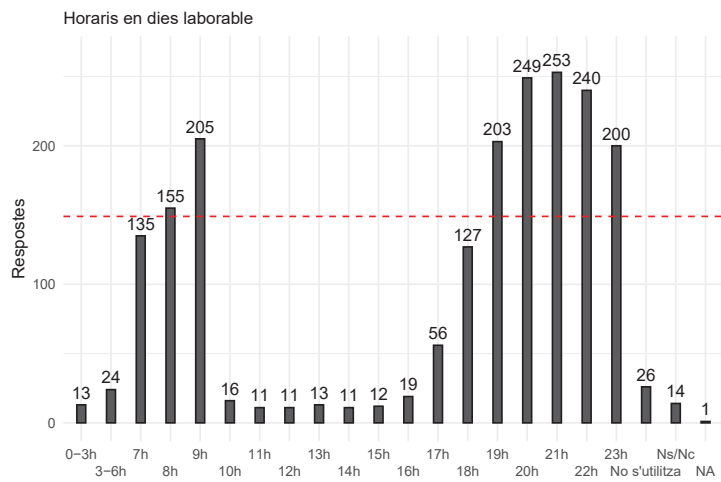
6 Il · luminació

6.1 Tipus de làmpades





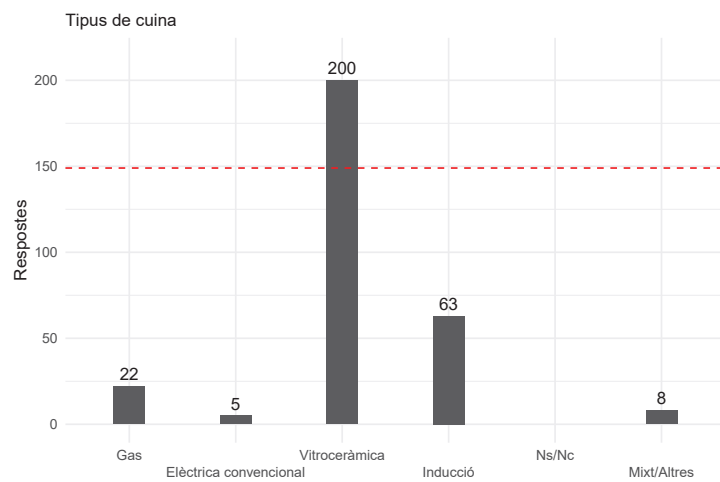
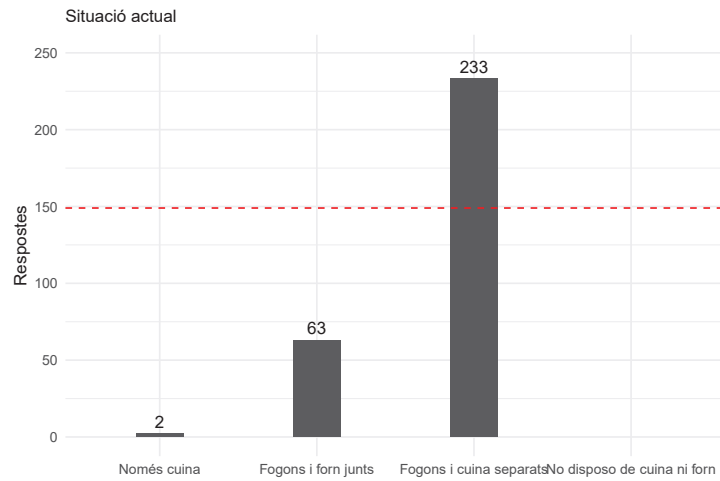
6.2 Ús de la il·luminació

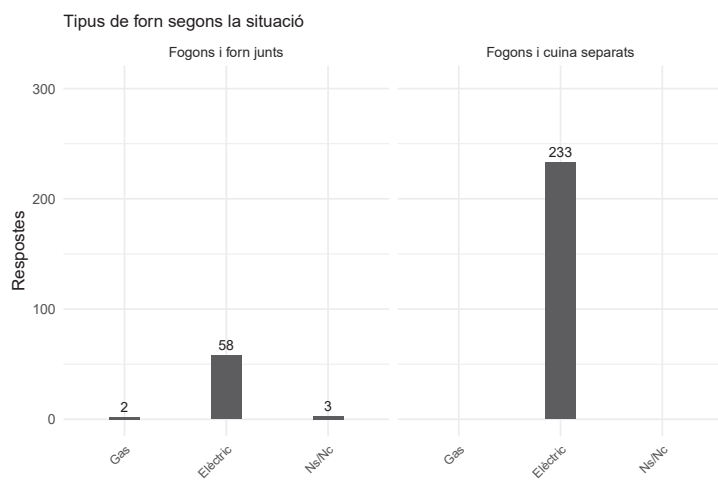
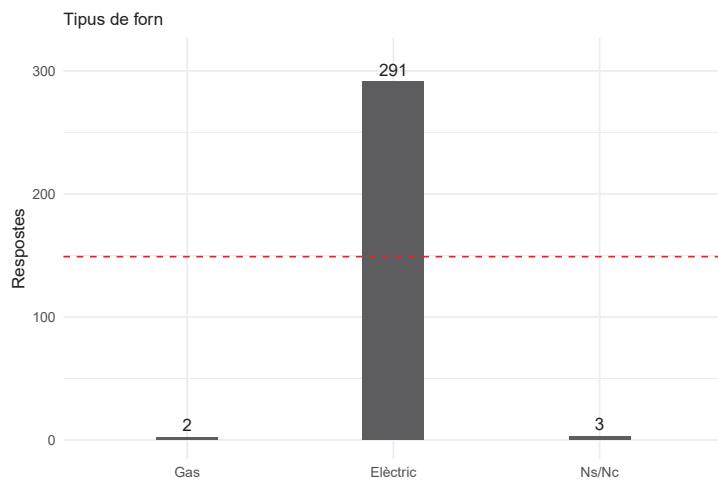
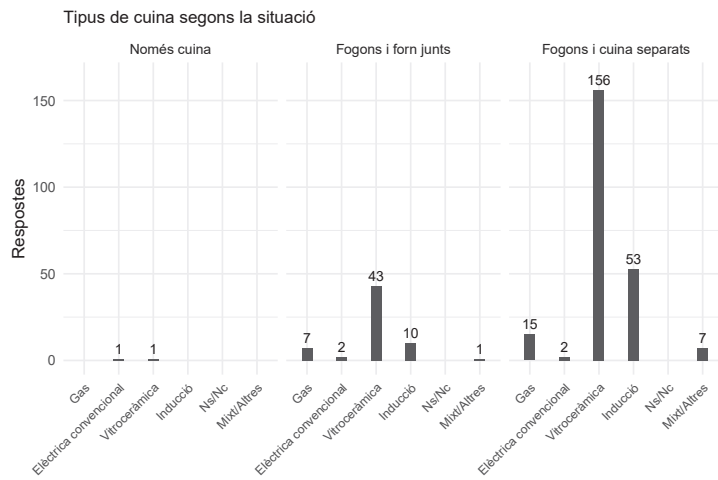


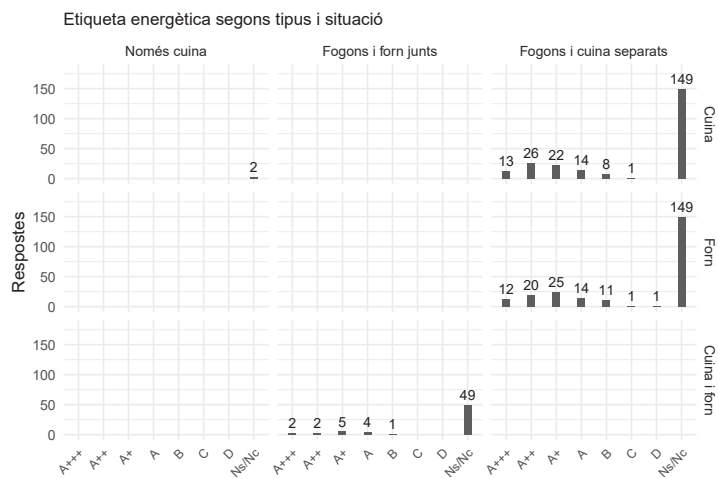
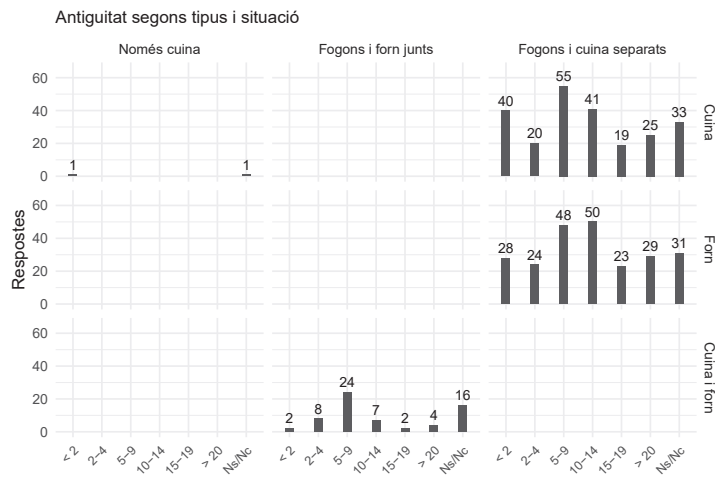
7 Electrodomèstics

7.1 Cuina i Forn

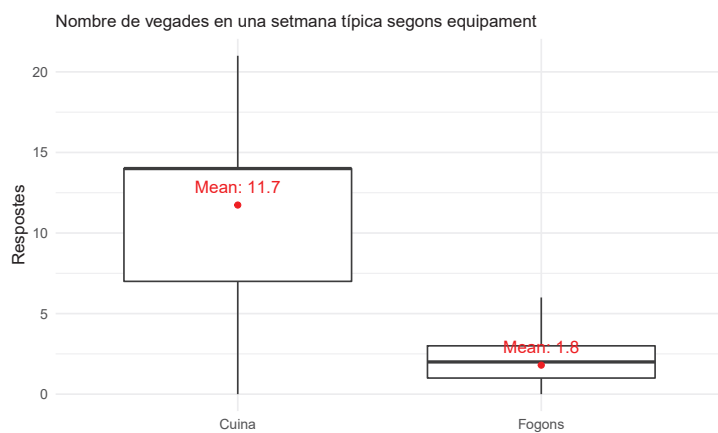
7.1.1 Característiques de la cuina i forn presents en l'habitatge

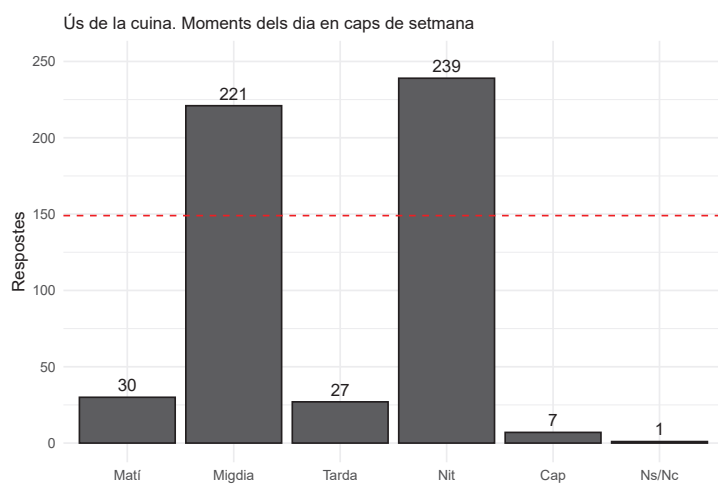
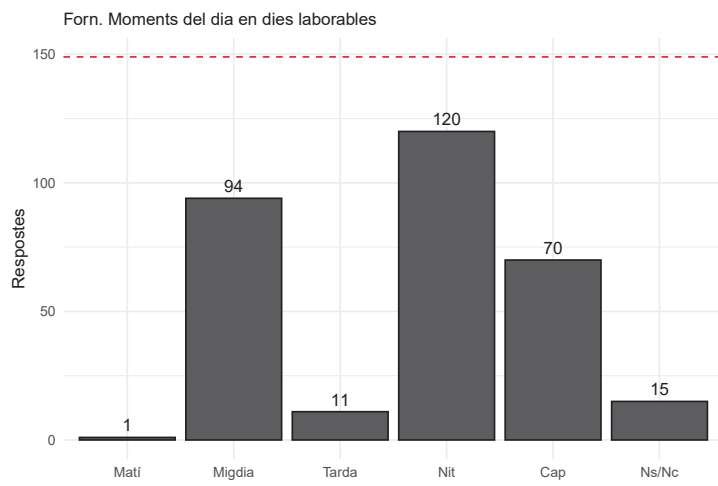
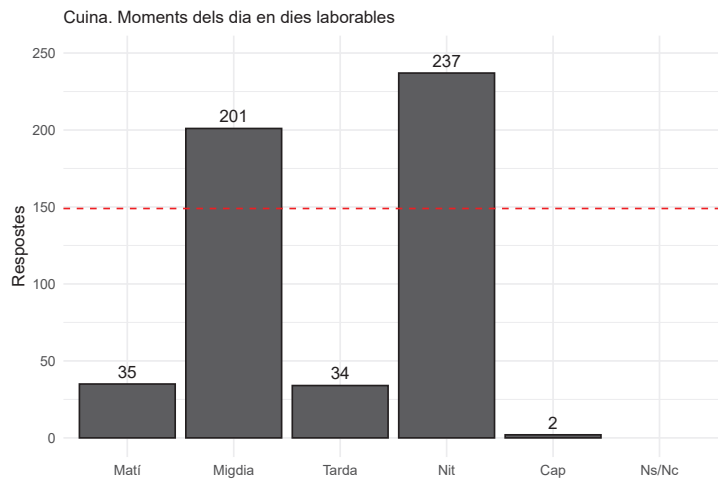


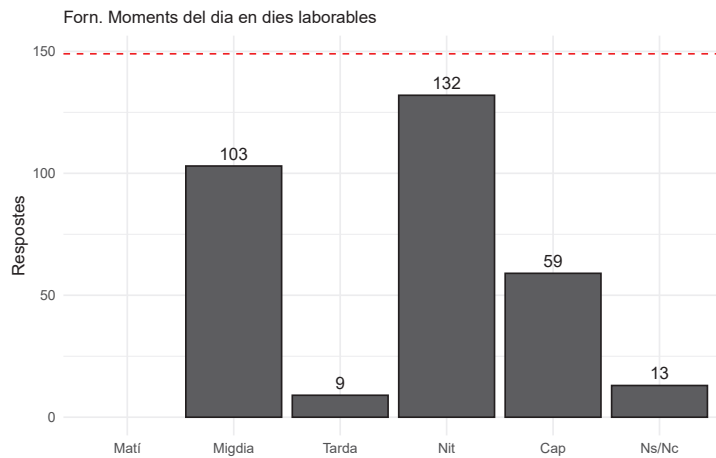




7.1.2 Ús de la cuina i el forn

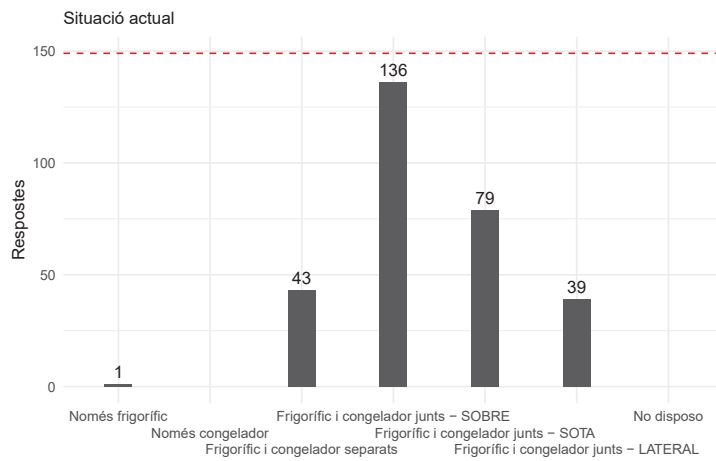




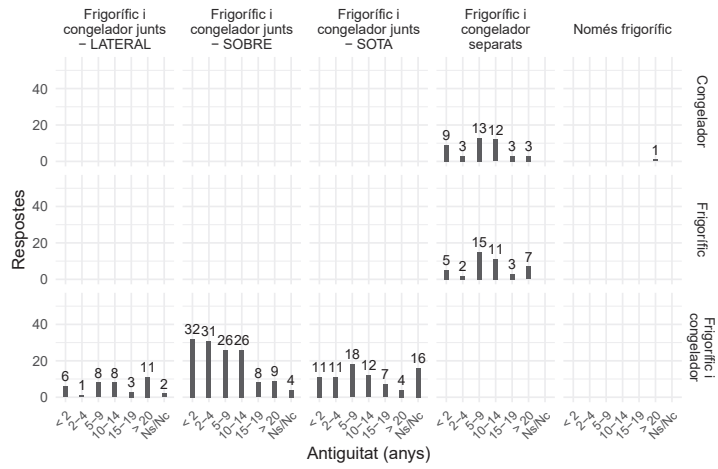


7.2 Frigorífic i congelador

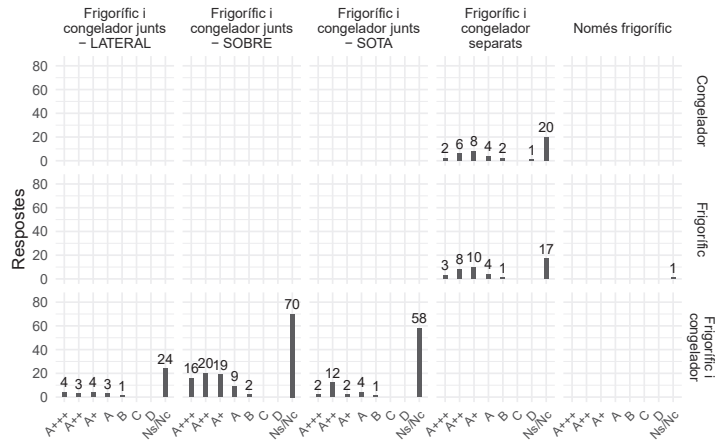
7.2.1 Característiques del frigorífic i el congelador presents en l'habitatge



Antiguitat segons tipus i situació

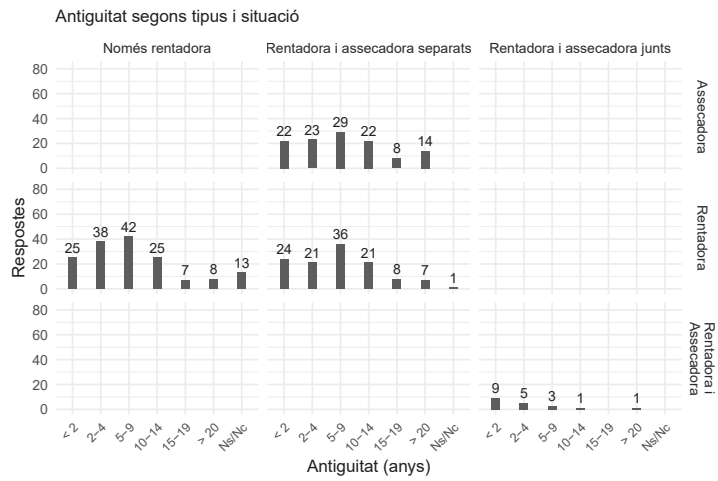
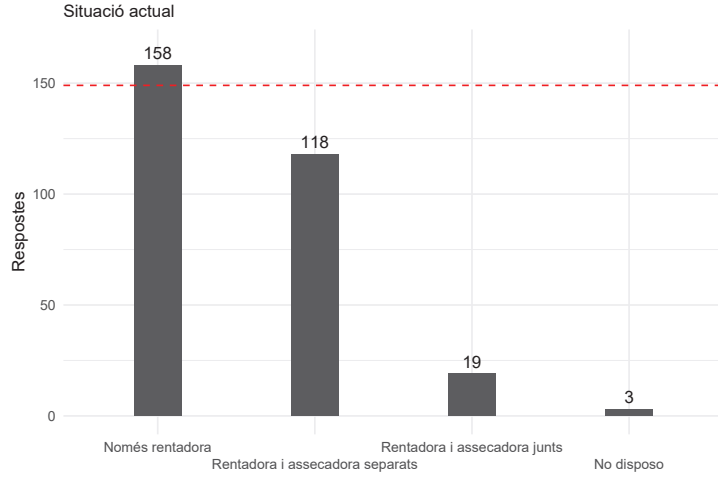


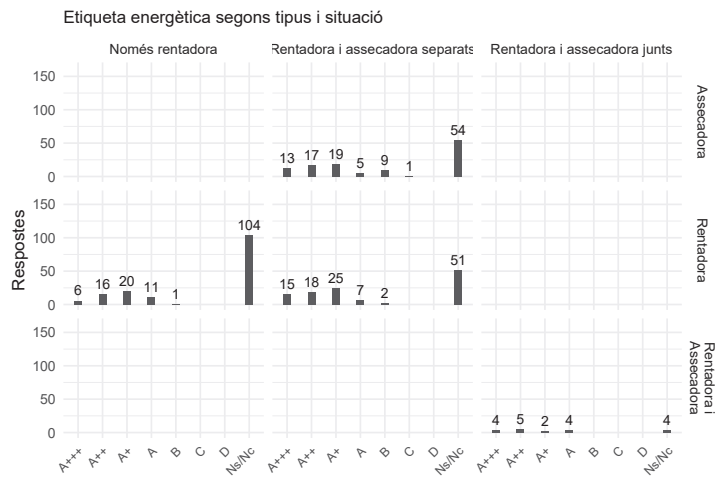
Etiqueta energètica segons tipus i situació



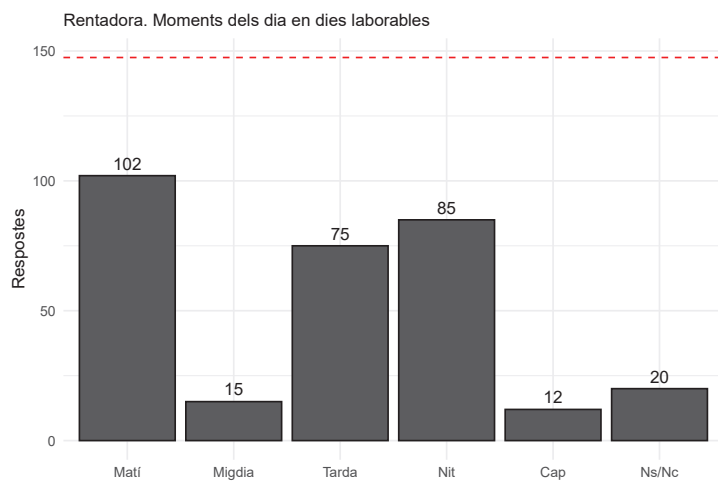
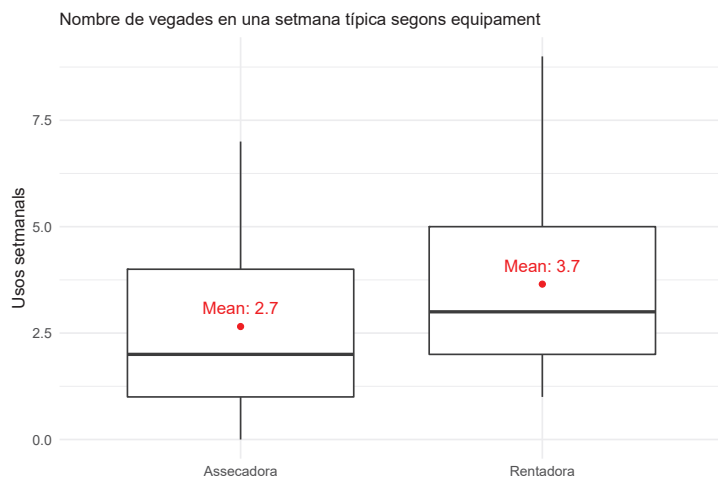
7.3 Rentadora i Assecadora

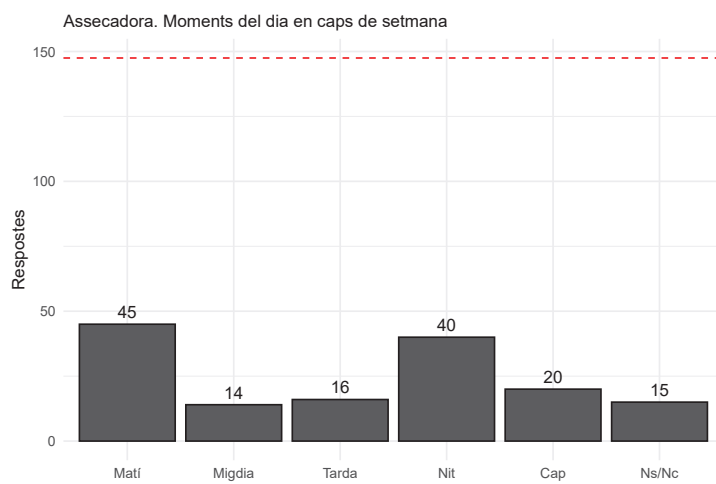
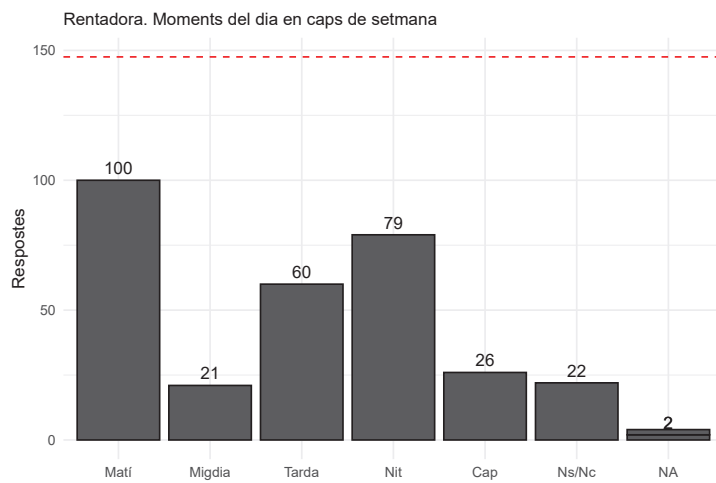
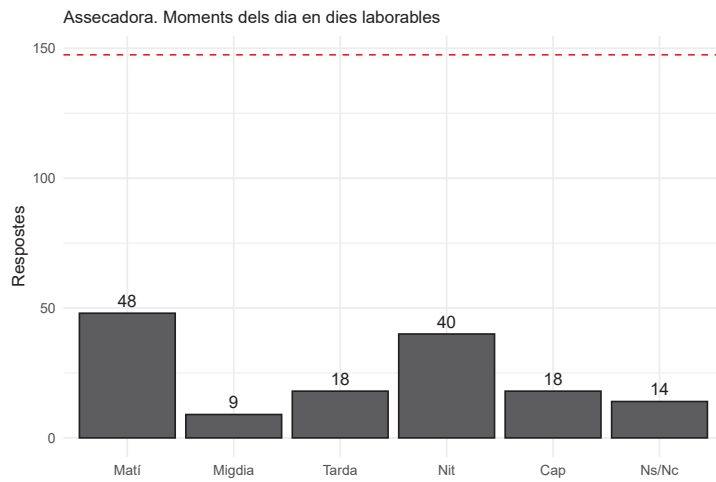
7.3.1 Característiques de la rentadora i l'assecadora presents en l'habitatge





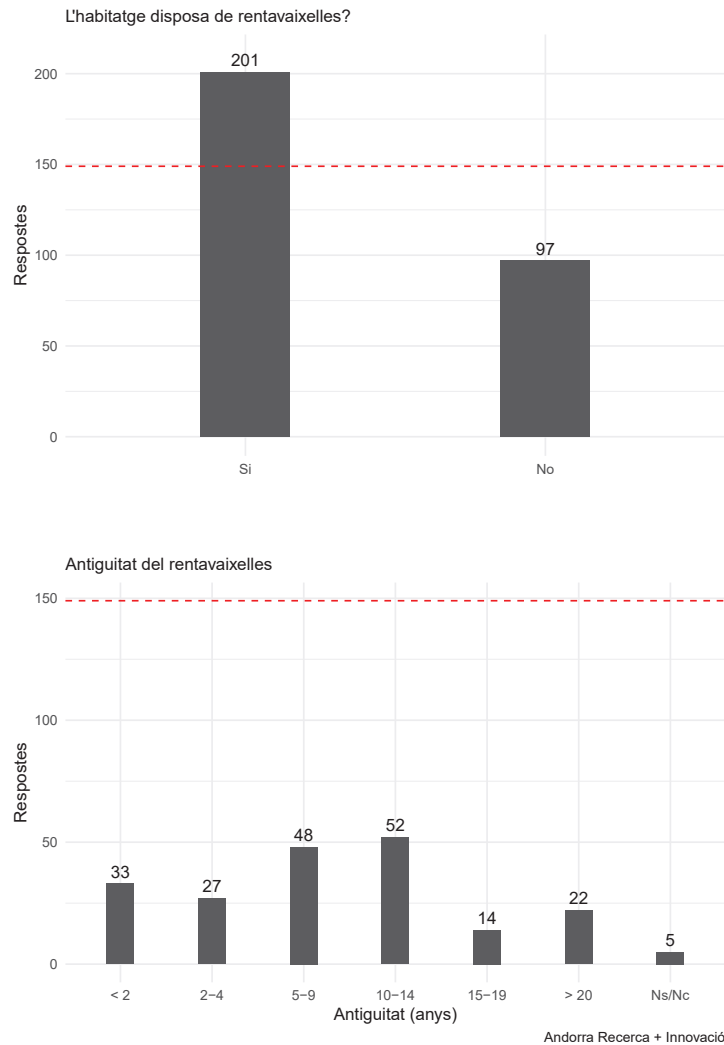
7.3.2 Ús de la rentadora i assecadora

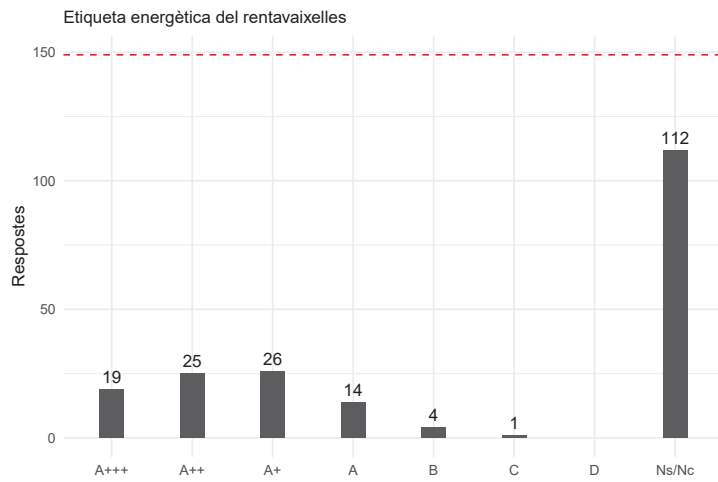




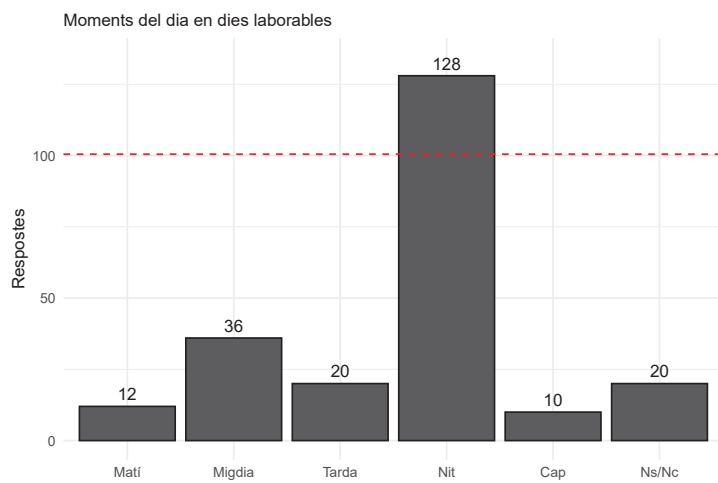
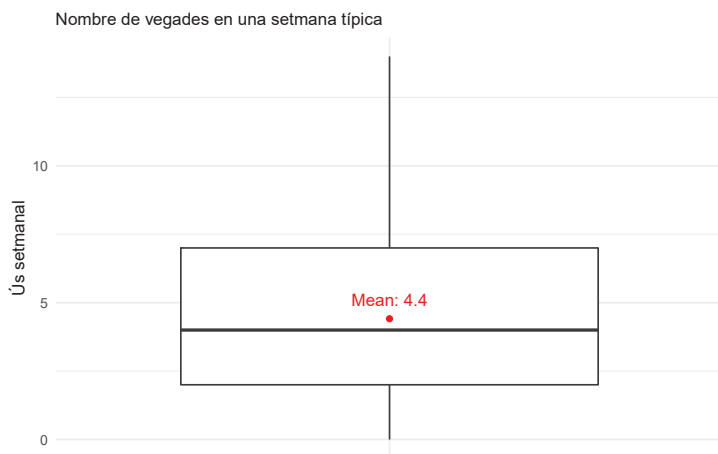
7.4 Rentavaixelles

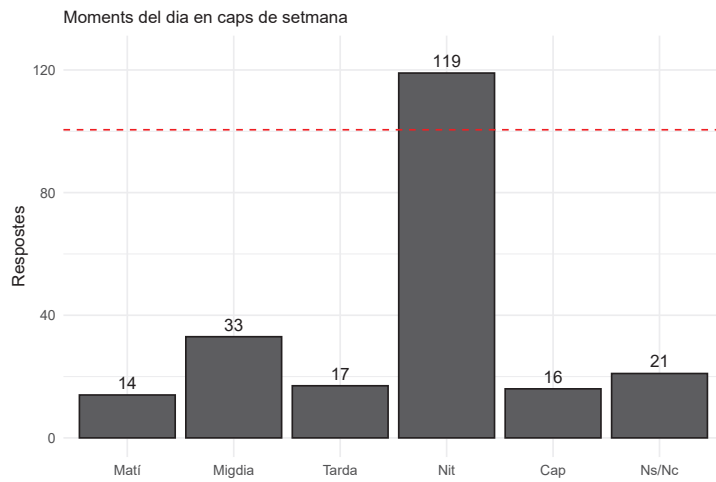
7.4.1 Característiques del rentavaixelles presents en l'habitatge





7.4.2 Ús del rentavaixelles

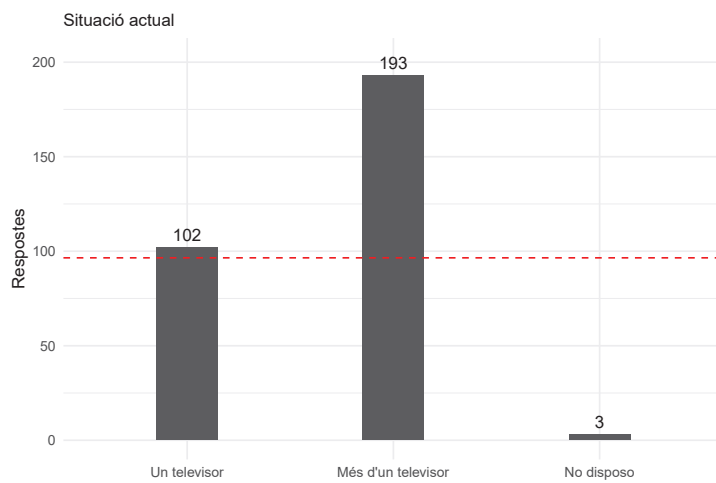


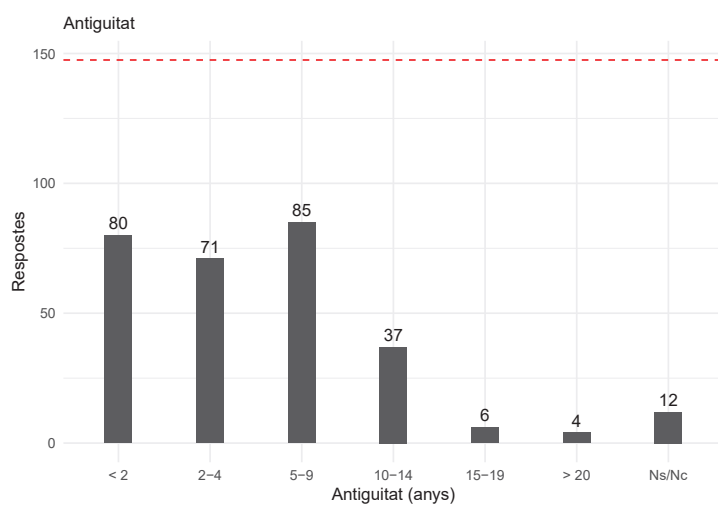
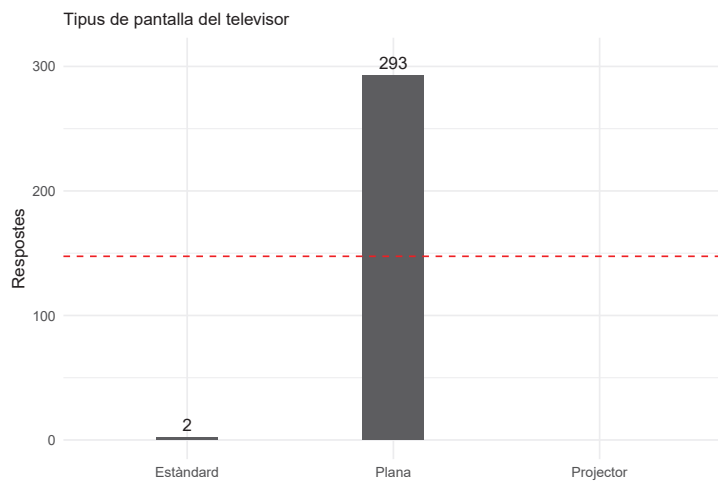
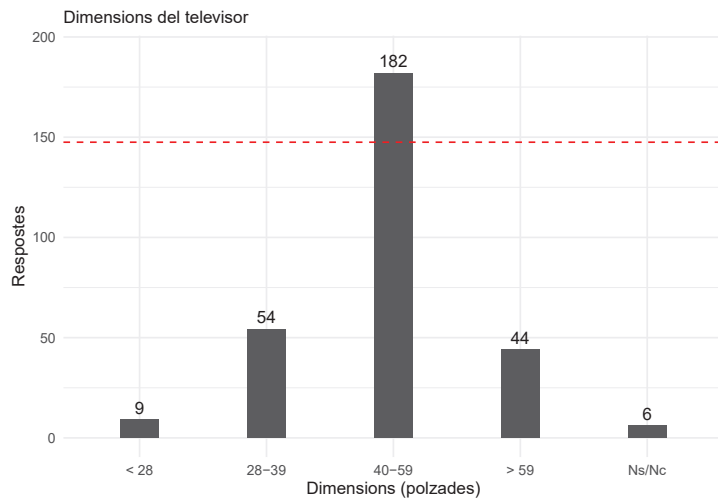


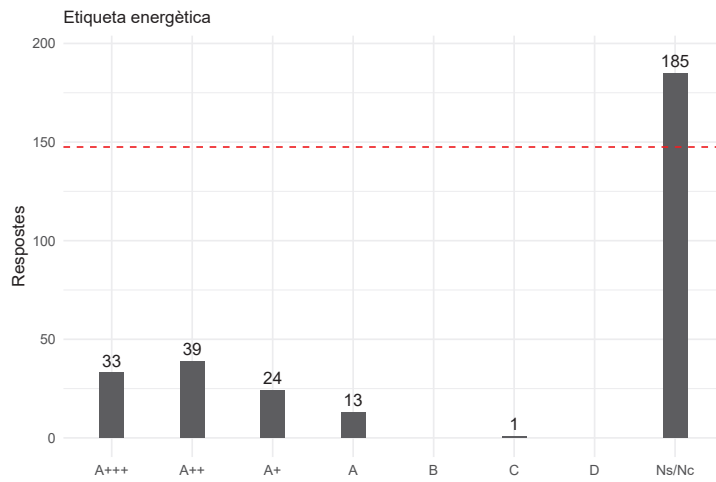
8 Aparells electrònics

8.1 Televisor

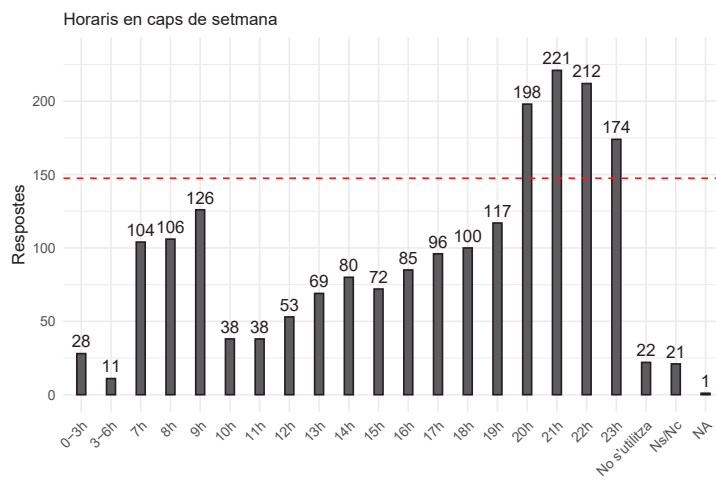
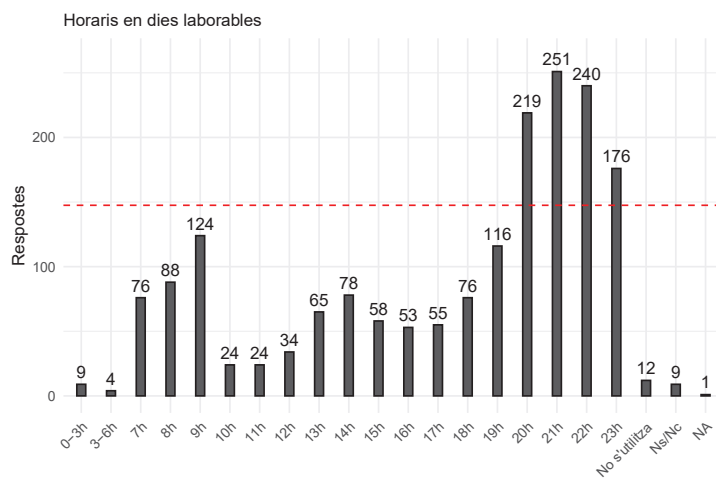
8.1.1 Característiques del televisor presents en l'habitatge







8.1.2 Ús del televisor



ANNEX F INFORMACIÓ APARELLS ELÈCTRICS

El present annex conté diferents informacions relacionades amb els aparells elèctrics utilitzats durant els transcurso de la present tesi doctoral.

La Taula F.1 recull els consums anuals per cadascun dels grans electrodomèstics extrets de la base de dades ODYSSEE, així com la mitjana de consum dels trams d'antiguitat considerats en l'enquesta.

Any	Antiguitat	Cuina	Frigorífic	Rentadora	Rentavaixelles	Assecadora	Televisor
1990	> 20	1162,8	422,69	338,3491	230,91	NA	131,40
1991	> 20	1162,8	422,69	338,181	230,73	NA	131,40
1992	> 20	1279,08	422,69	337,4667	230,46	NA	131,40
1993	> 20	1279,08	422,99	335,9743	230,17	NA	131,40
1994	> 20	1162,8	424,25	334,9678	229,77	NA	131,40
1995	> 20	1162,8	425,43	333,7528	229,24	NA	131,40
1996	> 20	1162,8	425,95	332,0724	228,67	NA	131,40
1997	> 20	1162,8	425,44	330,3304	228,08	NA	131,40
1998	> 20	1279,08	424,74	328,2043	227,37	NA	116,80
1999	> 20	1279,08	422,26	325,4167	226,46	NA	116,80
2000	> 20	1162,8	417,88	323,1598	225,27	NA	116,80
Mitjana		1205,08	423,37	332,53	228,83	NA	127,42
2001	15-19	1162,8	413,99	320,89	223,50	NA	109,67
2002	15-19	1162,8	410,13	318,24	221,50	NA	117,50
2003	15-19	1162,8	403,41	315,79	219,66	NA	125,33
2004	15-19	1162,8	395,57	312,87	217,17	482,55	133,16
2005	15-19	1046,52	387,32	309,51	215,02	483,22	154,56
Mitjana		1139,54	402,08	315,46	219,37	482,88	128,04
2006	10-14	1046,52	379,63	306,06	212,75	483,04	175,96
2007	10-14	1046,52	374,07	303,40	210,49	481,49	197,36
2008	10-14	1046,52	368,37	300,91	208,36	480,20	197,36
2009	10-14	1046,52	363,21	297,08	206,58	NA	197,36
2010	10-14	930,24	357,78	293,48	204,86	NA	197,36
Mitjana		1023,26	368,61	300,19	208,61	481,58	193,08
2011	5-9	1046,52	352,13	289,34	200,70	NA	197,36
2012	5-9	1046,52	345,56	284,98	196,99	NA	197,36
2013	5-9	930,24	338,44	279,99	191,76	NA	197,36
2014	5-9	465,12	331,34	275,01	188,24	NA	197,36
2015	5-9	930,24	323,52	269,54	184,40	NA	197,36
Mitjana		883,73	338,20	279,77	192,42	NA	197,36
2016	2-4	930,24	315,95	263,581	180,65	NA	197,36
2017	2-4	930,24	308,58	257,201	176,83	NA	197,36
Mitjana		930,24	312,27	260,39	178,74	NA	197,36
2018	< 2	930,24	301,42	250,55	172,83	NA	197,36
2019	< 2	813,96	294,52	245,04	169,28	NA	197,36
Mitjana		872,10	297,97	247,79	171,06	NA	197,36

Taula F.1. Consum anuals en kWh/any i mitjanes per grup d'antiguitat dels grans electrodomèstics entre els anys 1990 i 2019 a França

Font. Base de dades ODYSSEE

La Taula F.2 detalla els usos estimats per Maña, Cuchí, Díez, & Orgaz (2002) per cadascun dels grans aparells elèctrics exceptuant l'ús de l'assecadora estimat en base a les respostes de l'enquesta ECEER realitzada en el marc de la present tesi doctoral.

	Nº serveis per setmana	Durada del programa (en hores)	Hores de servei anuals
Cuina	2/dia	1,5	1095
Frigorífic	-	-	8760
Rentadora	5/setmana	1,5	390
Rentavaixelles	5/setmana	1	260
Assecadora*	3/setmana	1	156
Televisió	-	5h/dia	1825

Taula F.2. Utilització dels grans electrodomèstics

Font. Maña, Cuchí, Díez, & Orgaz (2002)

La Taula F.3 pes de cada electrodomèstic en la potencia total estimada per cada clúster

	RMF1	RMF2	RME1	RME2	RSF1	RSF2	RSE1	RSE2
Grans aparells elèctrics								
Cuina	32,8%	32%	45,9%	45,7%	19,8%	19,7%	19,3%	18,5%
Frigorífic	1,4%	1,5%	2%	2,1%	0,8%	0,9%	0,9%	0,8%
Rentadora	26,5%	27,5%	36,1%	35,9%	15,9%	15,3%	15,8%	14,5%
Assecadora	0%	0%	0%	0%	40%	40,8%	41,2%	42,4%
Rentavaixelles	28,1%	27,5%	0%	0%	17%	16,7%	16,3%	16,9%
Televisió	7,2%	4,1%	5,7%	5,8%	2,3%	2,3%	2,3%	2,5%
Petits aparells elèctrics								
Petits aparells elèctrics	7,2%	7,4%	10,6%	10,6%	4,2%	4,3%	4,3%	4,5%

Taula F.3. Pes dels grans i petits electrodomèstics en la potencia total per cadascun dels grups

Font. Elaboració pròpia

ANNEX G CÀLCUL DEL COEFICIENT D'AJUST DE LA TEMPERATURA DE L'AIGUA DE XARXA

Els coeficients d'ajust mensuals s'han determinat a partir de la diferència de temperatura entre la temperatura de l'aigua de xarxa i la temperatura de subministrament (60 °C) entre el mes més desfavorable que són gener i desembre i la resta de mesos. La Taula G.1 presenta la temperatura de xarxa per cadascun dels mesos, així com els diferencials de temperatura i els coeficients d'ajuts.

Mes	Temperatura xarxa	Diferència temperatura	Coefficient corrector
Gener	2,00 °C	58,00 °C	1,000000
Febrer	3,00 °C	57,00 °C	0,982759
Març	4,00 °C	56,00 °C	0,965517
Abril	5,00 °C	55,00 °C	0,948276
Maig	6,00 °C	54,00 °C	0,931034
Juny	7,00 °C	53,00 °C	0,913793
Juliol	8,00 °C	52,00 °C	0,896552
Agost	9,00 °C	51,00 °C	0,879310
Setembre	7,00 °C	53,00 °C	0,913793
Octubre	5,00 °C	55,00 °C	0,948276
Novembre	3,00 °C	57,00 °C	0,982759
Desembre	2,00 °C	58,00 °C	1,000000

Taula G.1. Càlcul dels coeficients d'ajust mensuals de l'ACS

Font. Elaboració pròpia

Per tal de verificar que el coeficients establerts compensen s'ha fet el test amb una de les zones tèrmiques del model. La Taula G.2 mostra els resultats obtinguts de les simulacions de la zona tèrmica analitzada modificant els valors de temperatura de xarxa a cada simulació, així com els resultats obtinguts aplicant els coeficients mensuals.

	Gen.	Feb.	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Sept.	Oct.	Nov.	Des.
2 °C	90,53	81,77	90,53	87,61	90,53	87,61	90,53	90,53	87,61	90,53	87,61	90,53
3 °C	88,97	80,36	88,97	86,10	88,97	86,10	88,97	88,97	86,10	88,97	86,10	88,97
4 °C	87,41	78,95	87,41	84,59	87,41	84,59	87,41	87,41	84,59	87,41	84,59	87,41
5 °C	85,85	77,54	85,85	83,08	85,85	83,08	85,85	85,85	83,08	85,85	83,08	85,85
6 °C	84,29	76,13	84,29	81,57	84,29	81,57	84,29	84,29	81,57	84,29	81,57	84,29
7 °C	82,73	74,72	82,73	80,06	82,73	80,06	82,73	82,73	80,06	82,73	80,06	82,73
8 °C	81,16	73,31	81,16	78,55	81,16	78,55	81,16	81,16	78,55	81,16	78,55	81,16
9 °C	79,60	71,90	79,60	77,04	79,60	77,04	79,60	79,60	77,04	79,60	77,04	79,60
7 °C	82,73	74,72	82,73	80,06	82,73	80,06	82,73	82,73	80,06	82,73	80,06	82,73
5 °C	85,85	77,54	85,85	83,08	85,85	83,08	85,85	85,85	83,08	85,85	83,08	85,85
3 °C	88,97	80,36	88,97	86,10	88,97	86,10	88,97	88,97	86,10	88,97	86,10	88,97
2 °C	90,53	81,77	90,53	87,61	90,53	87,61	90,53	90,53	87,61	90,53	87,61	90,53
	90,53	80,36	87,41	83,08	84,29	80,06	81,16	79,60	80,06	85,85	86,10	90,53

Taula G.2. Resultats de les simulacions modificant les temperatures de xarxa, i aplicant els coeficients correctors en Kwh

Font. Elaboració pròpia

ANNEX H PUBLICACIONS CIENTÍFIQUES

ATENCIÓ

Per respecte als drets de *copyright*, les pàgines 246 a 287 de la tesi contenint els articles mencionats a continuació, s'han de consultar en les webs dels editors.

- B.1** *Building archetypes in urban energy models. A comparative case study of deterministic and statistical methods in Andorra. Accepted extended abstract in IBPSA-Scotland Conference Urban Energy Simulation (uSIM18)*

http://www.ibpsa.org/proceedings/uSIM2018/p031_final.pdf

- B.2** *Modelización energética del parque edificado a escala urbana: encuestas como complemento a los datos catastrales en la fase de caracterización. CienciAmérica, 10, 41-56. doi: 10.33210/ca.v10i3.370*

<https://cienciamerica.edu.ec/index.php/uti/article/view/370/755>

- B.3** *Hybrid approach to representative building archetypes development for urban models - A case study in Andorra. Building and Environment, 215, 108958. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.108958*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132322002001>