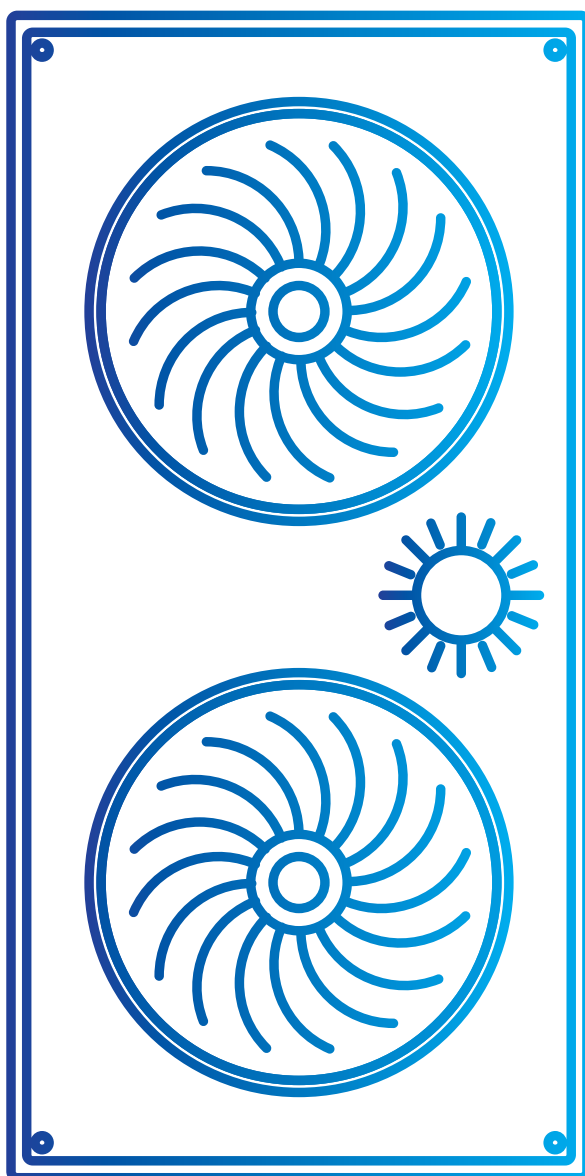


**TREBALLS TÈCNICS RELATIUS AL POTENCIAL DE
LES BOMBES DE CALOR AEROTÈRMiques D'ALTA
EFICIÈNCIA ENERGÈTICA PER A CLIMATITZACIÓ
I GENERACIÓ D'AIGUA CALENTA SANITÀRIA A
CATALUNYA.**

OCTUBRE 2020



1a edició: Octubre 2020

Editada per:

Institut Català d'Energia

Títol: Treballs tècnics relatius al potencial de les bombes de calor aerotèrmiques d'alta eficiència energètica per a climatització i generació d'aigua calenta sanitària a Catalunya.

Autors:

Thibault Péan – Institut de Recerca en Energia de Catalunya (IREC).
Joaquim Romaní – Institut de Recerca en Energia de Catalunya (IREC).
Elena Fuentes – Institut de Recerca en Energia de Catalunya (IREC).
Jaume Salom – Institut de Recerca en Energia de Catalunya (IREC).

Revisió del document:

Ainhoa Mata – Institut Català d'Energia (ICAEN).
César de Cara – Institut Català d'Energia (ICAEN).
David Villar – Institut Català d'Energia (ICAEN).
Lluís Morer – Institut Català d'Energia (ICAEN).

Versió electrònica:

icaen.gencat.cat/publicacions/

Avís legal:

Aquesta obra està subjecta a la llicència Reconeixement -NoComercial- SenseObraDerivada 3.0 de Creative Commons. Se'n permet la reproducció, distribució i comunicació pública sempre que se'n citi l'autor i no se'n faci un ús comercial de l'obra original ni la generació d'obres derivades. La llicència completa es pot consultar a: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.ca>



Índex

Índex	3
1. Introducció	5
2. Metodologies per a la determinació del rendiment estacional	6
2.1. Mètode 1: Normativa EN 14825 - mètode de «bins»	6
2.2. Mètode 2: Metodologia simplificada IDAE	6
2.3. Mètode 3: Experiments de dies tipus.....	7
2.4. Mètode 4: Simulacions dinàmiques anuals.....	8
3. Condicions de contorn utilitzades en les avaluacions	10
3.1. Dades climàtiques	10
3.1.1. Zones climàtiques a Catalunya	10
3.1.2. Selecció de dues zones climàtiques extremes per als assaigs de dies tipus	12
3.1.3. Selecció dels dies tipus per als climes B3 i E1	15
3.2. Dades d'habitatge.....	16
3.2.1. Tipologia d'habitatge	16
3.2.2. Sistemes emissors	17
3.2.3. Perfils de consum d'aigua calenta sanitària	18
3.3. Instal·lació de bomba de calor	20
3.3.1. Model de bomba de calor testejat	20
3.3.2. Corbes de regulació de calefacció	21
3.3.3. Definició d'experiments de laboratori	22
4. Resultats mètode 1: Normativa EN 14825	24
4.1. Assaigs experimentals estàtics segons EN 14825	24
4.2. Càlcul de l'SCOP	26
5. Resultats mètode 2: Metodologia simplificada IDAE	27
6. Resultats mètode 3: Dies tipus experimentals	28
6.1. Dies tipus amb radiadors	28
6.2. Dies tipus amb terra radiant.....	29
7. Resultats mètode 4: Simulacions anuals	32
7.1. Simulacions efectuades.....	32
7.2. Simulacions amb radiadors (temperatura mitjana)	32
7.3. Simulacions amb radiadors de baixa temperatura (temperatura intermèdia).....	33
7.4. Simulacions amb terra radiant (baixa temperatura)	33
7.5. Resum de les simulacions anuals.....	35
8. Anàlisi econòmica	37
9. Conclusions	42
10. Bibliografia	45

Annex 1: Taula completa de càlcul del CTU	46
Annex 2: Comparació en els climes C2 i E1 d'una renovació d'una caldera per una bomba de calor sense modificar la instal·lació existent (radiadors)	48

1. Introducció

L'objectiu principal de l'estudi és la realització d'una anàlisi tècnica i econòmica que permeti reflexionar i treure conclusions sobre viabilitat, limitacions i idoneïtat d'un sistema combinat de bomba de calor modulant (VSHP, *variable speed heat pump*) amb tanc d'aigua calenta sanitària (ACS) per a usos residencials a les diferents zones climàtiques de Catalunya i amb diferents tipus de sistemes emissors. El sistema proposat es compara, des d'un punt de vista econòmic, amb una solució de caldera de gas de condensació amb sistema emissor basat en radiadors d'alumini, conjuntament amb una instal·lació solar tèrmica per produir ACS. La realització de l'estudi es basa en la combinació d'experimentacions amb una VSHP sota condicions reals de funcionament d'acord amb tests semivirtuals per a dues zones climàtiques i dos tipus de sistemes emissors (terra radiant i radiadors d'alumini) i la seva extensió mitjançant simulacions anuals.

El present informe, a la secció 2, recull les diferents metodologies que s'han utilitzat en l'estudi. S'han emprat quatre mètodes diferents, que provenen de diferents fonts: estàndards d'assaig de bombes de calor, recomanacions de l'IDAE (Institut per a la Diversificació i Estalvi de l'Energia) o mètodes trobats en la literatura científica.

Posteriorment, a la secció 3, es descriuen les condicions de contorn que s'han triat per al cas d'estudi utilitzat en tot el treball. S'expliquen, en particular, les dades climàtiques, les dades de l'habitatge considerat, els paràmetres utilitzats en els entorns de simulació i experimentals, les dades del sistema de bomba de calor testejat, així com la seva configuració de control.

A continuació, es mostren els resultats en termes d'eficiència estacional (coeficient de rendiment estacional o SCOP, per les seves sigles en anglès, *seasonal coefficient of performance*). Les seccions 4 a 7 presenten una anàlisi detallada dels resultats obtinguts amb les diferents metodologies.

La secció 8 descriu una anàlisi econòmica del sistema de bomba de calor en els diferents climes de Catalunya. Aquesta anàlisi es basa en els resultats obtinguts prèviament del rendiment dels sistemes de bombes de calor utilitzant paràmetres econòmics derivats d'estudis previs de l'ICAEN (Institut Català d'Energia). Els costos d'una bomba de calor es comparen amb els d'un sistema tradicional de caldera de condensació que funciona amb gas natural conjuntament amb una instal·lació solar tèrmica per produir ACS amb la finalitat de determinar quines condicions són les més econòmiques per a cada tipus de sistema de calefacció.

Finalment, en l'apartat de conclusions, es resumeixen els resultats principals de l'estudi i s'expliquen les lliçons apreses.

2. Metodologies per a la determinació del rendiment estacional

En el present document es proposa treballar mitjançant la combinació de metodologies experimentals i sobre la base de simulació dinàmica. Es descriuen breument tres metodologies per a la determinació de l'eficiència anual de les bombes de calor que es basen en dades experimentals (i/o aportades pels fabricants d'acord amb assaigs experimentals normalitzats). També es comenta breument la metodologia de treball utilitzada, que es basa en la simulació.

2.1. Mètode 1: Normativa EN 14825 - mètode de «bins»

D'acord amb la normativa europea, la determinació del rendiment estacional (o SPF, per les seves sigles en anglès, *seasonal performance factor*) de les bombes de calor accionades elèctricament ha d'efectuar-se d'acord amb la norma EN 14825:2018 [1]. La metodologia establerta en aquesta norma consisteix en la determinació de l'SPF, anomenat $SCOP_{net}$ en aquesta normativa, a partir de l'extrapolació dels valors d'eficiència determinats en proves experimentals en diversos punts d'operació a càrrega parcial i a plena càrrega. L'extrapolació anual es fa sobre la base de tres perfils de clima estàndard concrets, en què l'SPF anual es calcula amb el balanç entre l'energia elèctrica consumida per la bomba de calor i la seva producció tèrmica.

S'utilitzen valors d'eficiència (coeficient d'eficiència energètica o COP, per les seves sigles en anglès, *coefficient of performance*) en diferents punts d'operació per extrapol·lar l'SPF. En l'àmbit d'aquest estudi, s'han considerat dues sèries per a aquests valors:

- **Valors del fabricant:** els valors de COP que proporciona el fabricant en el full tècnic del producte, que són obtinguts amb els assaigs d'acord amb la norma EN 14825, considerant una temperatura de sortida de la bomba de calor variable (que s'adapta a la temperatura ambient).
- **Valors propis:** els valors de COP que s'han obtingut experimentalment amb la bomba de calor instal·lada al laboratori. Aquests experiments s'han fet amb les mateixes condicions que els del fabricant (segons la norma, amb temperatura de sortida variable) i, per tant, es poden comparar amb els valors del fabricant, encara que reflecteixen un comportament en situació més real.

2.2. Mètode 2: Metodologia simplificada IDAE

En el cas d'Espanya, s'accepta com a mètode alternatiu al que es proposa en la norma EN 14825 [1] una metodologia simplificada especificada per l'IDAE en el document *Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para producción de calor en edificios (Prestacions mitjanes estacionals de les bombes de calor per a producció de calor en edificis)* [2]. Es tracta d'una metodologia simplificada en la qual es determina l'SPF a partir del valor d'eficiència nominal, anomenat $COP_{nominal}$, obtingut en proves amb condicions a plena càrrega i fent ús de dos factors que ajusten el seu valor. Aquests factors són els anomenats *de ponderació* (FP) i *de correcció* (FC), els quals s'apliquen d'acord amb l'expressió següent:

$$SPF = COP_{nominal} \cdot FP \cdot FC$$

El factor de ponderació FP és un paràmetre el valor del qual depèn de la zona climàtica d'Espanya per a la qual es fan els càlculs, d'acord amb especificacions del Codi tècnic de l'edificació (CTE). El factor de correcció FC té en consideració la diferència entre la temperatura d'ús (condicionada pel sistema d'emissió) i la temperatura amb la qual s'ha obtingut el COP en l'assaig de les condicions nominals.

Els valors dels factors FC i FP es poden veure a la Taula 1 i a la Taula 2.

Taula 1. Factors de correcció (FC) segons les temperatures de condensació i segons la temperatura d'assaig del COP [2]

Temperatura de condensació (°C)	FC (COP a 35 °C)	FC (COP a 40 °C)	FC (COP a 45 °C)	FC (COP a 50 °C)	FC (COP a 55 °C)	FC (COP a 60 °C)
35	1,00	-	-	-	-	-
40	0,87	1,00	-	-	-	-
45	0,77	0,89	1,00	-	-	-
50	0,68	0,78	0,88	1,00	-	-
55	0,61	0,70	0,79	0,90	1,00	-
60	0,55	0,63	0,71	0,81	0,90	1,00

Taula 2. Valors del factor de ponderació [2]

Font energètica de la bomba de calor	Factor de ponderació (FP) segons clima				
	A	B	C	D	E
Energia aerotèrmica. Equips centralitzats	0,87	0,80	0,80	0,75	0,75
Energia aerotèrmica. Equips individuals tipus <i>split</i>	0,66	0,68	0,68	0,64	0,64
Energia hidrotèrmica	0,99	0,96	0,92	0,86	0,80
Energia geotèrmica de circuit tancat. Intercanviadors horitzontals	1,05	1,01	0,97	0,90	0,85
Energia geotèrmica de circuit tancat. Intercanviadors verticals	1,24	1,23	1,18	1,11	1,03
Energia geotèrmica de circuit obert	1,31	1,30	1,23	1,17	1,09

2.3. Mètode 3: Experiments de dies tipus

Una limitació dels mètodes establerts per la normativa per a l'etiquetatge energètic [1] és que aquests estan basats en el càlcul de l'eficiència anual a partir d'un nombre limitat de punts d'operació obtinguts en condicions nominals estacionàries, plena càrrega i càrrega parcial.

Un mètode alternatiu per a la determinació de l'SPF anual es basa en l'operació de les bombes de calor a estudiar en condicions dinàmiques durant diversos dies tipus seleccionats mitjançant mètodes numèrics. Aquests dies tipus representen la manera d'operació de la màquina durant els períodes de refrigeració o de calefacció per a un clima i edifici concrets. El mètode consisteix a realitzar experiments de laboratori sobre dies tipus de vint-i-quatre hores per caracteritzar l'eficiència de la bomba de calor d'acord amb les càrregues dinàmiques d'un model virtual d'edifici. L'extrapolació dels resultats d'eficiència obtinguts dels experiments dels dies tipus a les condicions anuals permet fer una estimació de l'SPF anual [3]. Es considera que aquesta metodologia pot aportar resultats de rendiment més realistes que els obtinguts amb el mètode de la norma 14825:2018 i el mètode de l'IDAE, ja que treballa amb models d'habitatge i perfils climàtics específics de les zones d'interès i, a més, es basa en assajos de la màquina en condicions dinàmiques. L'aplicació d'aquesta metodologia es fa d'acord amb assaigs experimentals de laboratori.

L'eficiència de sistemes de climatització com les bombes de calor està molt determinada pel seu comportament dinàmic; per tant, l'avaluació més adequada del comportament energètic d'aquests sistemes ha de fer-se en assajos de tipus dinàmic en relació amb les condicions climatològiques i les condicions de càrrega tèrmica. El disseny del procediment d'assaig dinàmic per a aquests sistemes ha de ser econòmicament viable, reduït en el temps i fiable.

El mètode d'assaig proposat per a l'estudi de l'eficiència de bombes aerotèrmiques en aquest projecte està basat en l'operació del sistema en una seqüència de dies tipus que són representatius de les condicions de funcionament de la màquina en tot el període de demanda de calefacció (Figura 1). Aquesta metodologia s'ha establert i validat en estudis previs i permet determinar el rendiment estacional anual de bombes de calor per extrapolació de l'eficiència del sistema en la seqüència de dies tipus al període anual [4], [5]. En aquests estudis s'ha demostrat que és possible determinar l'SPF anual amb desviacions inferiors al 5% a partir de seqüències de dies tipus de quatre dies [4].

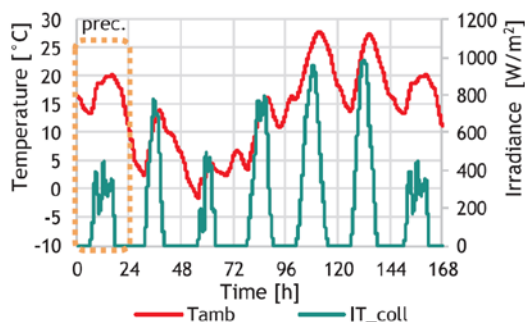


Figura 1. Exemple de seqüència de sis dies per a un sistema de bomba de calor amb suport de solar tèrmica per a subministrament de calefacció i ACS

Tamb = temperatura exterior; IT_coll = radiació sobre col·lector [5].

Per a la selecció dels dies tipus, els dies de l'any amb càrrega tèrmica es classifiquen per similitud en una sèrie de grups en funció de les seves característiques meteorològiques. Una vegada classificats, se selecciona un dia que representa les característiques de càrrega tèrmica del grup al qual pertany. En aquest projecte s'utilitza el mètode denominat *kmeans-GA*, el qual consta d'un mètode de classificació de dies amb càrrega de calefacció d'acord amb les seves característiques climatològiques de radiació i temperatura exterior dins de grups o «clústers» amb nombre igual al nombre de dies tipus. Una vegada feta aquesta classificació, dins de cada grup se selecciona el dia amb càrrega tèrmica que extrapolada al nombre de dies del grup més s'aproxima a la càrrega tèrmica integrada d'aquest. Aquest mètode de selecció es realitza mitjançant un algorisme genètic sobre els individus de cada clúster.

Els experiments de dies tipus només consideren dues zones climàtiques i dos sistemes emissors per limitar el nombre d'assaigs a quatre. L'elecció d'aquestes zones climàtiques s'explica en la secció de metodologia. El total dels climes de Catalunya s'estudia després amb les simulacions detallades.

2.4. Mètode 4: Simulacions dinàmiques anuals

La metodologia de simulació es basa en la realització de simulacions anuals d'un model de bomba de calor acoblat a un edifici tipus de tal manera que és possible determinar els valors de comportament estacional per a diferents configuracions del sistema (emissors), tipologies d'edifici i zones climàtiques, variant algun d'aquests elements en la simulació. Els models de bombes de calor per a la seva integració en simulacions anuals es basen normalment en la correcció del rendiment de l'equip en condicions de treball de càrrega parcial d'acord amb un mapa de rendiment en condicions estacionàries. Aquesta aproximació a la modelització té algunes limitacions en el cas de bombes de calor modulants (VSHP, *variable speed heat pumps*), ja que requereix el calibratge i la validació dels models per a una millor representació de la realitat.

En aquest estudi, s'ha utilitzat un model detallat de la bomba de calor. El model es basa en un mapa experimental del rendiment de la bomba de calor obtingut amb assaigs estàtics en

diverses condicions de temperatura ambient (regulat en la cambra climàtica), de temperatura de sortida i de temperatura de retorn. Aquests assaigs van permetre obtenir un model polinòmic del consum elèctric de la bomba de calor. A més, la regulació interna de la bomba de calor forma part també del model. Un controlador PI regula el nivell de freqüència del compressor per arribar a la temperatura de sortida desitjada. Els paràmetres del PI s'han ajustat amb dades històriques experimentals perquè reproduïxin el comportament dinàmic observat amb la bomba de calor real. Aquest model ha estat validat per reproduir la dinàmica ràpida de la bomba i els valors de consum i producció d'energia mesurats al llarg de diversos dies; per tant, representa el comportament de la bomba de calor escollida amb alta fidelitat [6].

Les simulacions anuals s'han executat amb el *software* TRNSYS, que permet efectuar simulacions dinàmiques detallades d'una gran varietat de sistemes energètics. El model complet inclou el model detallat de la bomba de calor, el model d'edifici tal com es presenta en les properes seccions i els fitxers externs que contenen la informació de les dades meteorològiques per a les diferents zones climàtiques (dades horàries) i els perfils d'ocupació i d'ús d'aigua calenta sanitària (dades cada minut). Les simulacions es realitzen amb un pas de càlcul temporal d'un minut per a un any sencer. Per a l'anàlisi dels resultats, només es consideren les temporades de calefacció i, per tant, s'exclou el període d'estiu. S'han fet un total de quaranta-dues simulacions, considerant les possibles combinacions de les set zones climàtiques de Catalunya, tres sistemes emissors i dues configuracions de regulació de la temperatura d'impulsió (constant o amb corba de calefacció per a la compensació meteorològica).

3. Condicions de contorn utilitzades en les avaluacions

L'objectiu d'aquesta secció és la descripció de les condicions de contorn (zona climàtica, càrregues de calefacció i ACS i sistemes emissors) i la preparació, adaptació i/o desenvolupament dels models virtuals necessaris per a la realització dels tests experimentals, incloent-hi la selecció dels dies tipus. Es descriuen les condicions de contorn acordades amb l'ICAEN després de la valoració tècnica de les alternatives possibles per a la realització del treball.

3.1. Dades climàtiques

3.1.1. Zones climàtiques a Catalunya

D'acord amb el CTE [7], poden trobar-se set zones climàtiques en la geografia de Catalunya, que es mostren a la Figura 2.1.

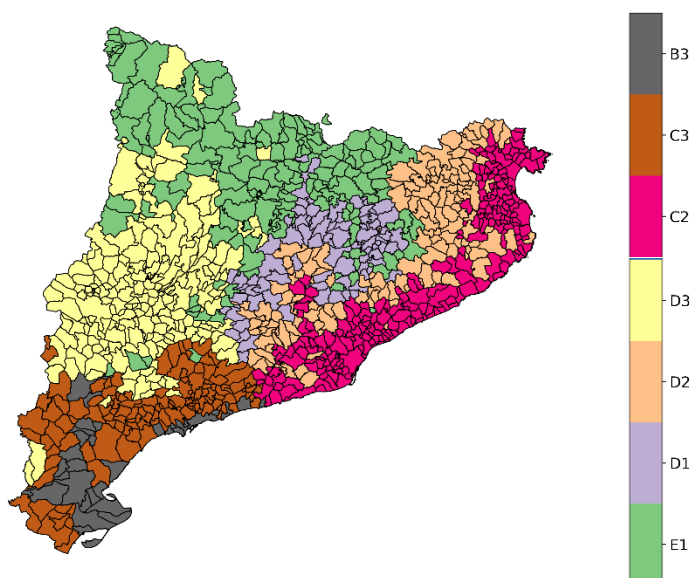


Figura 2.1. Distribució en zones climàtiques dels municipis de Catalunya d'acord amb el CTE 2013 [7]

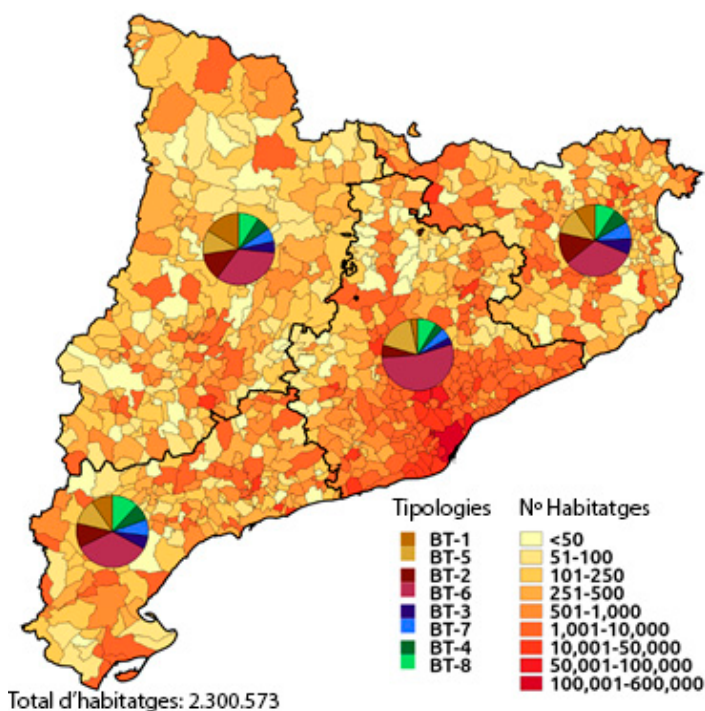


Figura 2.2. Nombre, tipologia* i densitat d'habitatges a Catalunya

*Tipologia BT-1, unifamiliar abans de 1950; BT-2, unifamiliar entre 1951 i 1980; BT-3, unifamiliar entre 1980 i 1990; BT-4, unifamiliar entre 1990 i 2011; BT-5, plurifamiliar abans de 1950; BT-6, plurifamiliar entre 1951 i 1980; BT-7, unifamiliar entre 1981 i 1990; BT-8, plurifamiliar entre 1991 i 2011.

Per a les simulacions anuals (mètode 4), calen dades meteorològiques que representin un any típic dels climes considerats. Amb aquesta finalitat, s'utilitzen els anys meteorològics típics (TMY) del programari Meteonorm. A la Taula 3 es detallen les ubicacions de les ciutats de referència considerades per a cada zona climàtica del CTE. Les ciutats de referència dels climes B3 i C3 són molt properes geogràficament i els climes s'assemblen bastant. Per això, i per al propòsit d'aquest estudi, els climes de les zones B3 i C3 s'assimilen i se simulen totes dues amb les dades meteorològiques de Tarragona.

Taula 3. Climes a Catalunya

Clima CTE	Ciutat de referència	Correspondència amb climes normativa EN 14825
B3	Tarragona	~ clima <i>warmer</i>
C3	Reus	
C2	Barcelona	
D3	Lleida	
D2	Girona	
D1	Vic	
E1	Puigcerdà	~ clima <i>average</i>

3.1.2. Selecció de dues zones climàtiques extremes per als assaigs de dies tipus

Per a la part experimental de dies tipus (mètode 3), s'han de seleccionar dues zones climàtiques de referència rellevants en la zona geogràfica de Catalunya per a l'avaluació de l'eficiència de les bombes de calor. Per a la selecció de climes, s'ha valorat la classificació de zones climàtiques d'acord amb el CTE en comparació amb els perfils de calefacció proposats en la normativa EN 14825:2018 [1] per a tres zones climàtiques de referència (*warmer*, *average* i *colder*).

Els histogrames de perfils de temperatura seca corresponents als set climes a Catalunya d'acord amb el CTE s'han comparat amb els perfils de calefacció de l'estàndard EN 14825:2018 (hores de calefacció en funció de la temperatura externa per als tres climes de referència). Dels climes considerats, s'han seleccionat per a l'estudi els corresponents als climes B3 i E1, que s'aproximen als perfils *warmer* i *average* de la norma EN 14825:2018 (figura 2.1). Aquests dos climes representen els dos extrems que es poden trobar a Catalunya.

Els perfils de temperatura i radiació horitzontal de les dades del CTE dels climes E1 i B3 s'han comparat amb perfils de la base de dades de Meteonorm per a localitats prepirinenques (E1) i Tarragona (B3), com es mostra en aquesta secció.

Els histogrames de temperatura comparats en la Figura 3 mostren que els perfils del CTE i Meteonorm es troben situats en regions de temperatura similar; no obstant això, hi ha una desviació en el nombre d'hores amb un error d'RMSE (*root mean squared error*) entre 127 i 180 h entre els histogrames (Taula 4). Per al clima E1, a més de Puigcerdà, s'han considerat diversos perfils de Meteonorm per a la zona prepirinenca [8] (el Pont de Suert, Vielha, la Seu d'Urgell i Ripoll) (Figura 4, Taula 4). Entre aquests perfils, el que més s'acosta al perfil E1 és el de Puigcerdà, amb RMSE de 103 h.

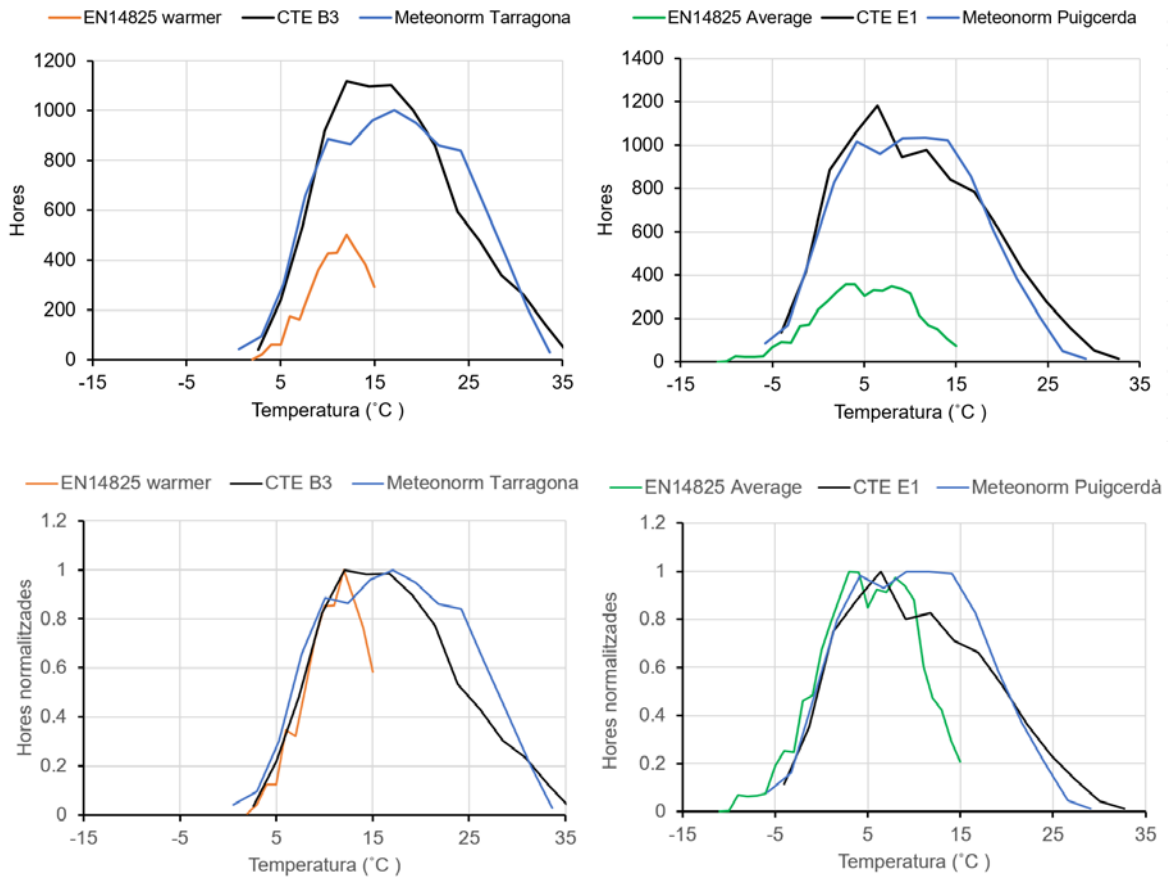


Figura 3. Distribució horària absoluta i normalitzada de temperatures per als climes B3 i E1 del CTE en comparació amb perfils de Meteonorm (Tarragona per a B3 i Puigcerdà per a E1) i perfils d'estàndard EN 14825

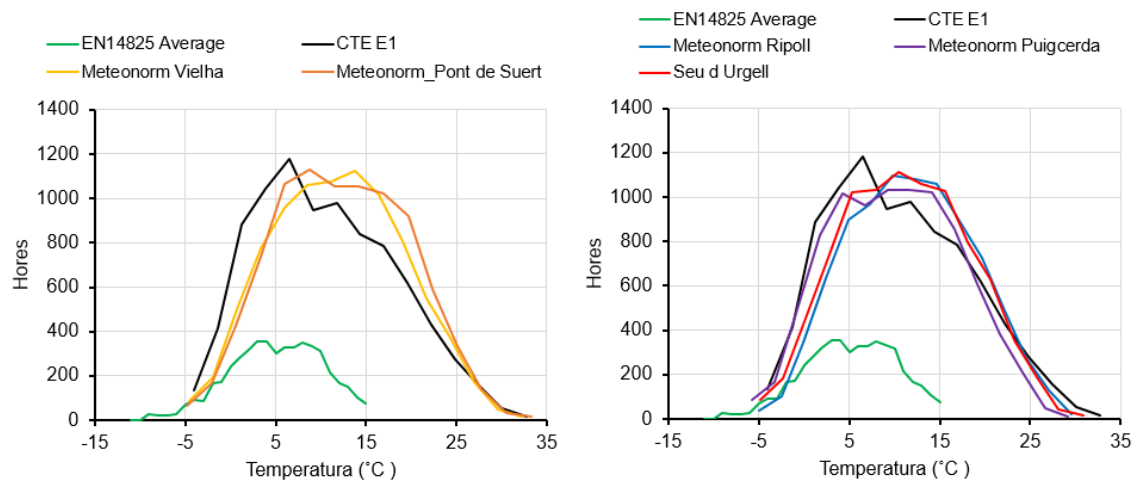


Figura 4. Distribució horària de temperatures per al clima E1 del CTE en comparació amb perfils de Meteonorm de Ripoll, el Pont de Suert, Vielha, la Seu d'Urgell i Puigcerdà, i perfil d'estàndard EN 14825

Taula 4. Comparació d'error RSME entre CTE i Meteororm

Perfil	RMSE		
	Radiació mensual (MJ/m ²)	Temperatura mitjana mensual (°C)	Distribució d'hores de temperatura (h)
Tarragona (B3)	28,4	1,16	127
Ripoll (E1)	59,8	1,60	180
Puigcerdà (E1)	83,8	1,15	103
La Seu d'Urgell (E1)	91,0	1,25	143
Vielha (E1)	31,9	1,69	172
El Pont de Suert (E1)	88,8	2,05	179

Les figures 5 i 6 mostren els perfils de temperatura mitjana mensual per als perfils del CTE i de Meteororm considerats. D'acord amb aquesta comparació, el perfil de Tarragona presenta una desviació amb RSME d'1,16 °C respecte al CTE B3, mentre que el perfil de Meteororm de Puigcerdà és el més aproximat al perfil E1, amb RSME d'1,15 °C.

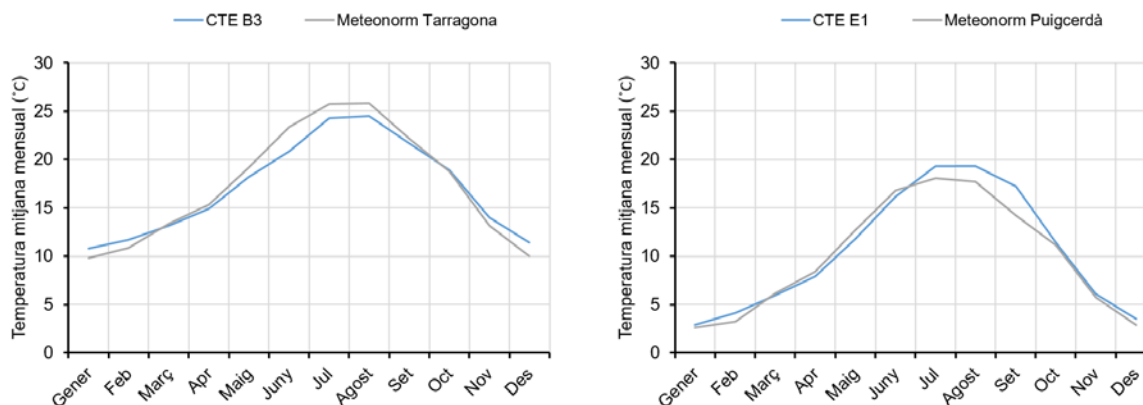


Figura 5. Temperatura mitjana mensual en perfils de Meteororm i CTE (Tarragona per a B3 i Puigcerdà per a E1)

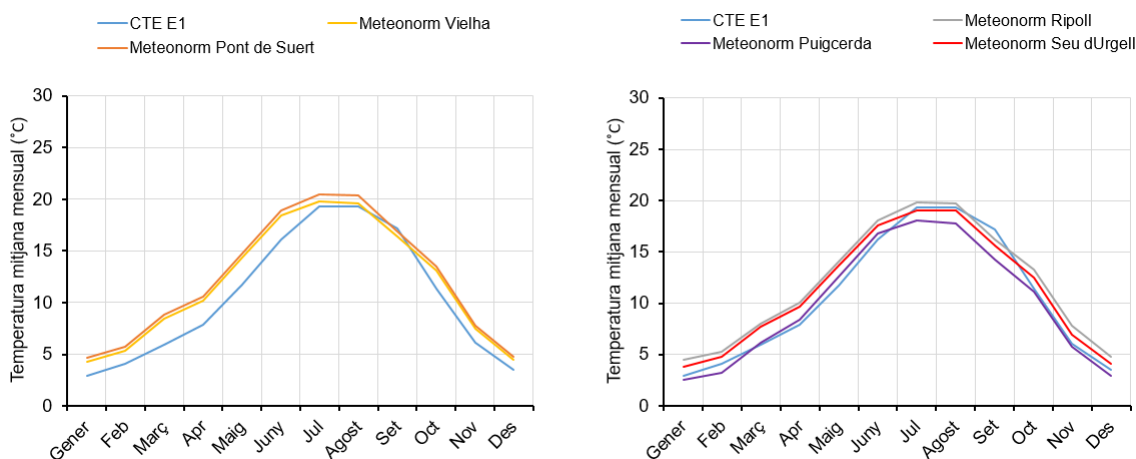


Figura 6. Temperatura mitjana mensual en perfils de CTE E1 i perfils de Meteororm de Ripoll, el Pont de Suert, Vielha, la Seu d'Urgell i Puigcerdà

Com es pot observar a la Taula 4, també s'han comparat els nivells d'irradiació solar per a les diferents ciutats en relació amb el clima CTE E1. La ciutat de Vielha és la més propera al clima CTE E1 pel que fa a la irradiació solar. No obstant això, atès que la temperatura ambiental és el paràmetre més rellevant quant a la demanda de calefacció i rendiment de les bombes de calor, Puigcerdà va ser escollida la ciutat més representativa del clima E1, ja que té la temperatura mínima d'RMSE respecte a la temperatura exterior.

Els perfils de Meteororm i de CTE són semblants per a la zona de Tarragona, representada per la zona climàtica B3; tanmateix, per a la zona prepirinenca existeixen variacions significatives depenent de la localitat. Així doncs, atès que els perfils de Meteororm fan una representació més fidel de les zones geogràfiques considerades, en aquest estudi s'utilitzen aquests perfils i s'ha triat el perfil de Tarragona com a representatiu de la zona B3 i el perfil de Puigcerdà com a representatiu de la zona E1.

3.1.3. Selecció dels dies tipus per als climes B3 i E1

Després d'haver seleccionat els dos climes que s'estudiaran a les proves experimentals (mètode 3), cal escollir quatre dies típics d'aquests climes. Per a aquest propòsit, s'ha utilitzat l'eina SELDIT [9]. Aquesta eina agrupa els dies de la temporada de calefacció en clústers, depenent de la seva temperatura exterior mitjana i la irradiació solar sumada. Per a cada clúster, el dia que millor representa la càrrega de calefacció del clúster s'escull com el dia típic.

La Figura 7 i la Figura 8 mostren la classificació dels dies de l'any per al clima de Tarragona (B3) i Puigcerdà (E1) en quatre clústers depenent de la seva temperatura mitjana i radiació total diària. Per a la classificació dels dies tipus, primer s'han filtrat aquells dies de l'any que corresponen al període càlid, d'acord amb el model de confort de Fanger [10], [11]. D'acord amb aquest model, el període càlid per a B3 és d'abril a octubre i per a E1, de juny a mitjans d'octubre. La clusterització s'ha fet amb el mètode kmeans-GA (algoritme genètic). En les figures, les estrelles indiquen el punt de cada grup que millor representa el conjunt respecte a la càrrega de calefacció diària i corresponen al dia tipus. Els dies seleccionats per als dos tipus d'emissors s'indiquen a la Taula 5. S'apliquen dies tipus diferents en funció de l'emissor perquè afecten la càrrega de l'habitatge, a més del clima.

Taula 5. Dies tipus seleccionats per als climes de Tarragona i Puigcerdà amb mètode kmeans-GA

Dies tipus	Tarragona (B3) Radiadors	Tarragona (B3) Terra radiant	Puigcerdà (E1) Radiadors	Puigcerdà (E1) Terra radiant
1	29/01	05/01	22/02	25/01
2	04/02	15/01	25/02	23/04
3	10/02	19/02	18/05	13/05
4	23/03	18/12	26/12	30/10

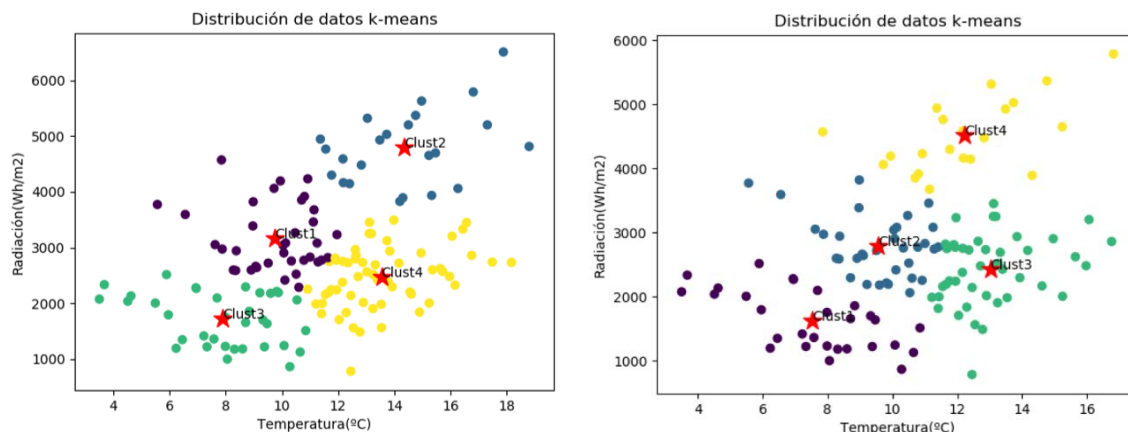


Figura 7. Classificació i selecció de quatre dies tipus per al clima de Tarragona segons l'algoritme kmeans-GA (radiadors a l'esquerra, terra radiant a la dreta)

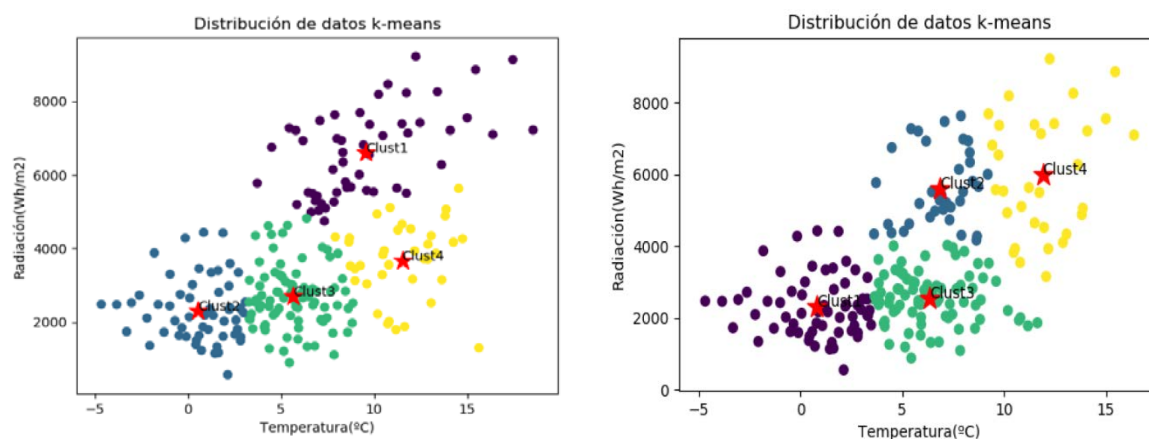


Figura 8. Classificació i selecció de quatre dies tipus per al clima Puigcerdà segons l'algoritme kmeans-GA (radiadors a l'esquerra, terra radiant a la dreta)

3.2. Dades d'habitatge

3.2.1. Tipologia d'habitatge

La distribució de l'habitatge escollit per a l'estudi es presenta a la Figura 9. És un edifici unifamiliar adossat de tres plantes amb un total de 175 m², el qual està dividit en un total de nou zones (dos a la planta baixa, quatre a la 1a planta i tres a la 2a planta). Es tracta d'una casa representativa de la tipologia d'edificis BT-4, construïda entre 1991 i 2007 [11]. Les condicions de contorn per a la simulació estan descrites a la Taula 6.

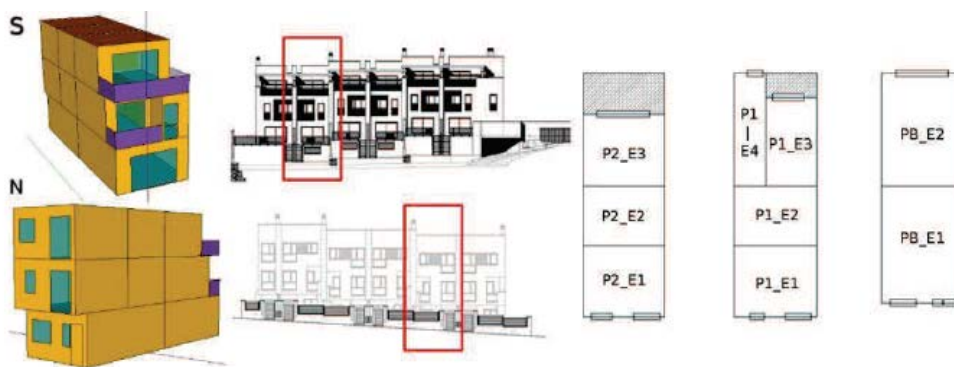


Figura 9. Esquema i localització de l'habitatge de referència

Taula 6. Condicions de contorn de l'habitatge de referència

Paràmetre	Condicions
Infiltració	Segons EN 15242 $n_{50} = 7,5$ ren/h (dades projecte MARIE)
Temperatures consigna	20 °C de dia (6 h a 22 h) 17 °C de nit
Perfil ocupació	Estocàstic per família de quatre ocupants Indica si hi ha ús actiu dels equipaments
Guanyos interns ocupació	Segons UNE 7730 [10] en funció del nombre d'ocupants i de l'activitat dia o nit Dia 70 W/m ² (superfície cos) Nit 46 W/m ² (superfície cos) Superfície cos (1.72+1.9)/2 m ² per ocupant (mitjana superfície homes i dones)
Guanyos interns equipament	Segons CTE 2,2 W/m ² amb ocupació activa Fracció radiativa 0,2
Guanyos interns il·luminació	En funció del control il·luminació per zones Apagat llum >200 lux Encès llum <150 lux Potència 2 W/m ² Eficiència 0,6

3.2.2. Sistemes emissors

Per a l'edifici de referència s'han tingut en compte tres tipus de sistemes emissors: radiadors d'alumini d'alta o baixa temperatura i terra radiant. Els tres tipus de sistemes s'han dimensionat considerant que han de cobrir la demanda; a la taula 7, s'indiquen les demandes per zones de l'edifici, en el cas del clima E1. Les característiques de cada sistema emissor estan descrites a les respectives seccions.

Taula 7. Demanda i superfícies de les zones de l'edifici

Paràmetre	Denominació zona									
	PB_E1	PB_E2	P1_E1	P1_E2	P1_E3	P1_E4	P2_E1	P2_E2	P2_E3	Total
Superfície [m²]	30,9	29,9	18,9	15,9	14,5	11,4	18,9	15,9	19,0	175,3
Demanda pic [W]	2501,7	2565,2	1449,9	537,9	959,4	809,7	1387,4	614,2	1334,7	12014,5
Demanda pic específica [W·m⁻²]	81,0	85,8	76,7	33,8	66,2	71,0	73,4	38,6	70,2	68,5

Els radiadors s'han caracteritzat segons les característiques tècniques de catàleg proporcionades pels fabricants considerant radiador d'alumini amb frontal obert. Donat que la bomba de calor seleccionada té una temperatura de subministrament màxima de 55 °C, els radiadors no treballaran a les condicions de disseny proporcionades pel fabricant. Per tant, el nombre d'elements que conformen el radiador s'ha calculat estimant la potència a les condicions seleccionades d'acord amb la norma EN 442 [12]. Les condicions de disseny del circuit de radiadors són una temperatura de subministrament de 55 °C, una diferència de temperatura de l'aigua de 10 K i un cabal total de 20,4 l/min.

En el cas dels radiadors de baixa temperatura, la temperatura de subministrament de disseny és de 45 °C. Aquestes condicions suposen una transferència de calor i una potència tèrmica reduïdes i, per tant, els radiadors s'han de redimensionar. Conseqüentment, els radiadors de baixa temperatura són aproximadament un 50% més grans que els d'alta temperatura per arribar al mateix nivell de potència que permet cobrir la demanda, però amb una temperatura de subministrament reduïda de 10 °C. El nombre d'elements hidràulics en els radiadors de cada zona s'indica a la Taula 8, en què es pot veure l'increment de mida quan disminueix la temperatura de disseny. En el cas de reforma d'un habitatge existent en què es volguessin aprofitar els radiadors existents per a aplicacions de temperatura més baixa, es podrien implementar radiadors addicionals al circuit de sistemes emissors, si fos necessari.

Taula 8. Nombre d'elements hidràulics en els radiadors de cada zona, comparant els dos tipus de radiadors

	Nombre d'elements hidràulics en els radiadors de cada zona								
	PB_E1	PB_E2	P1_E1	P1_E2	P1_E3	P1_E4	P2_E1	P2_E2	P2_E3
Radiadors d'alta temperatura (55 °C)	33	33	19	8	14	11	18	9	18
Radiadors de baixa temperatura (45 °C)	54	56	32	12	21	18	30	13	29

Per a l'anàlisi realitzada en aquest estudi, s'ha considerat el cas del sobredimensionament dels radiadors de baixa temperatura (45 °C) per tal d'assegurar que s'assoleix el nivell òptim de transferència de calor dels elements emissors i, per tant, de funcionament del sistema. Tanmateix, en l'annex 2 hi ha una comparació energètica per als climes C2 i E1 entre radiadors a temperatura d'impulsió constant a 55 °C o bé a 45 °C sense que s'hagi sobredimensionat la mida dels radiadors de 45 °C per compensar la baixa temperatura d'impulsió.

El terra radiant s'ha dimensionat seguint la norma UNE-EN 1264:2009 [13]. S'ha considerat un terra radiant de tipus A (tubs dins de la placa). L'espaiat entre tubs s'ha seleccionat verificant que no superen les condicions límit d'emissió en funció del revestiment. La temperatura de subministrament s'ha considerat comuna per a totes les zones i s'ha calculat tenint en compte la zona amb la demanda energètica superior. Aquestes condicions de disseny són temperatura de subministrament de 42 °C, una diferència de temperatura de l'aigua de 5 K, espaiat entre tubs del terra radiant de 20 cm i un cabal total de 30,8 l/min.

3.2.3. Perfils de consum d'aigua calenta sanitària

Per a la selecció del perfil de consum d'aigua calenta sanitària (ACS), s'ha tingut en compte la nota aclaridora RITE 1/2018 [14], que estableix consideracions per a la substitució de l'aportació solar mínima per a la producció d'ACS mitjançant bomba de calor aerotèrmica, aprovada per la Direcció General d'Energia, Seguretat Industrial i Seguretat Minera. Segons aquesta nota tècnica, la determinació del rendiment estacional de bombes aerotèrmiques ha de fer-se

d'acord amb els assajos de la norma EN 16147:2017 [15] amb una temperatura de distribució d'ACS de 55 °C.

En el present estudi es considera un consum diari d'ACS per persona de 28 l/dia a 60 °C segons el CTE, que per a un habitatge unifamiliar de quatre persones implica una demanda de 112 l/dia a 60 °C, cosa que correspon a 122 l/dia a 55 °C. Tenint en compte aquesta demanda diària, per a l'estudi es tria el cicle d'extraccions tipus M de l'estàndard EN 16147:2017. Aquest cicle implica una extracció d'energia de 5,85 kWh/dia, que es correspon amb un volum total d'extracció d'ACS de 122,9 l/dia a 55 °C (110 l/dia a 60 °C) i una temperatura de l'aigua freda de xarxa de 14 °C.

Per a la creació dels perfils diaris d'ACS, s'ha tingut en compte la mitjana anual de la temperatura de l'aigua freda de xarxa obtinguda a partir de valors mensuals per província del document tècnic CTE HE [16]. La Taula 9 indica la temperatura d'aigua freda de xarxa mitjana anual per als dos climes seleccionats.

Taula 9. Resum d'implementació del cicle M per a la generació de perfils d'ACS. Volum d'ACS a 55 °C calculat considerant la temperatura de l'aigua freda de xarxa

Temperatura mitjana anual d'aigua freda de xarxa (CTE HE)		Demanda d'energia del cicle M implementat		Demanda de volum d'ACS del cicle M a 55 °C	
B3	E1	B3	E1	B3	E1
14,9 °C	12,9 °C	5,7 kWh	5,9 kWh	122,9 l/dia	122,9 l/dia

A partir dels valors d'energia per a cadascuna de les extraccions individuals del perfil M i les temperatures de distribució i d'aigua freda, s'obtenen les durades d'aquestes extraccions. Les energies i els volums totals per a la implementació del cicle M obtinguts amb aquestes consideracions s'inclouen a la Taula 9.

El perfil d'extracció d'ACS resultant per a la seva implementació com a cicle M s'il·lustra en la Figura 10. El perfil consta de 23 extraccions, de les quals 19 són extraccions menors (tipus lavabo), 2 extraccions mitjanes de 4 litres per minut i 2 extraccions majors de 6 litres per minut.

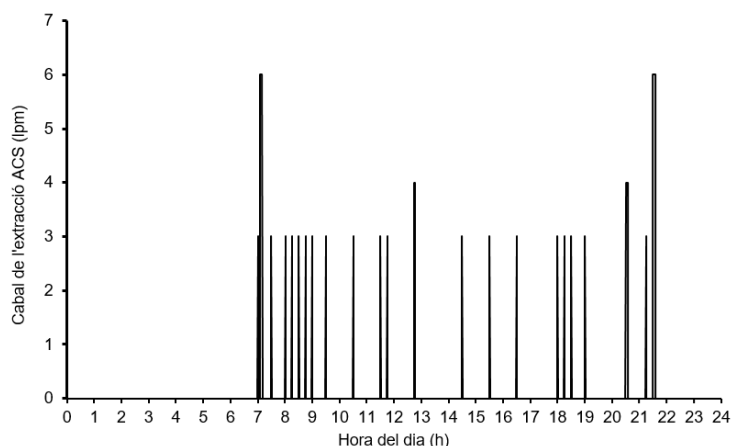


Figura 10. Perfils diaris d'extracció d'ACS a implementar per als climes de Tarragona (B3) i Puigcerdà (E1)

3.3. Instal·lació de bomba de calor

3.3.1. Model de bomba de calor testejat

La bomba de calor aire-aigua del projecte és una bomba de velocitat de compressor variable, d'última generació disponible al mercat, per a aplicació residencial i amb un tanc d'emmagatzematge d'ACS integrat. Les característiques tècniques de la bomba de calor s'especifiquen a continuació.

Taula 10. Especificacions tècniques de la bomba de calor testejada

Condicions nominals: calefacció, 40/45 °C aigua, 7 °C de temperatura ambient; refrigeració, 12/7 °C aigua, 35 °C de temperatura ambient. DC: *direct current*.

Potència nominal calefacció	11 kW
COP nominal	3,98
Potència nominal refrigeració	7,2 kW
EER nominal	3,3
Tanc ACS	200 L
Cabal d'aigua de calefacció/refrigeració	26 l/min
Cabal d'aigua ACS	33 l/min
Refrigerant	R-410A
Compressor	<i>Scroll</i> accionat per DC <i>inverter</i>
Flux d'aire	80 m ³ /min

La bomba de calor es troba instal·lada en el laboratori de l'IREC per a la realització d'assajos dinàmics en mode calefacció i refrigeració. Per a la reproducció de les condicions d'aire exterior, la bomba està instal·lada dins d'una cambra climàtica de 45 m³ que permet reproduir perfils dinàmics de temperatura i humitat en el rang de -30 a +60 °C i de 15 a 98%, respectivament. Les càrregues tèrmiques en el costat de l'aigua s'emulen mitjançant una sèrie de bancs d'assajos equipats amb bescanviadors de calor que permet reproduir la càrrega de calefacció o refrigeració d'un edifici virtual de manera dinàmica mitjançant el control del cabal i la temperatura de retorn de l'edifici.

D'altra banda, per reproduir el perfil de consum d'ACS, un banc tèrmic emula els cabals d'extracció aplicats sobre el tanc d'ACS integrat amb la bomba de calor, mentre que l'aigua freda de la xarxa d'entrada al tanc de la bomba s'obté d'un acumulador d'aigua extern on s'emmagatzema aigua a la temperatura mitjana mensual de xarxa d'aigua freda que correspon a l'experiment.

El control de la bomba de calor estarà basat en una corba de calefacció en funció de la temperatura externa, que és el tipus de control típic en instal·lacions d'aquesta mena a Catalunya.

La instal·lació de la bomba de calor en el laboratori es pot veure a la Figura 11.



Figura 11. Instal·lació de la bomba de calor en el laboratori: unitat exterior dins de la cambra climàtica, unitat interior amb tanc integrat fora de la cambra climàtica

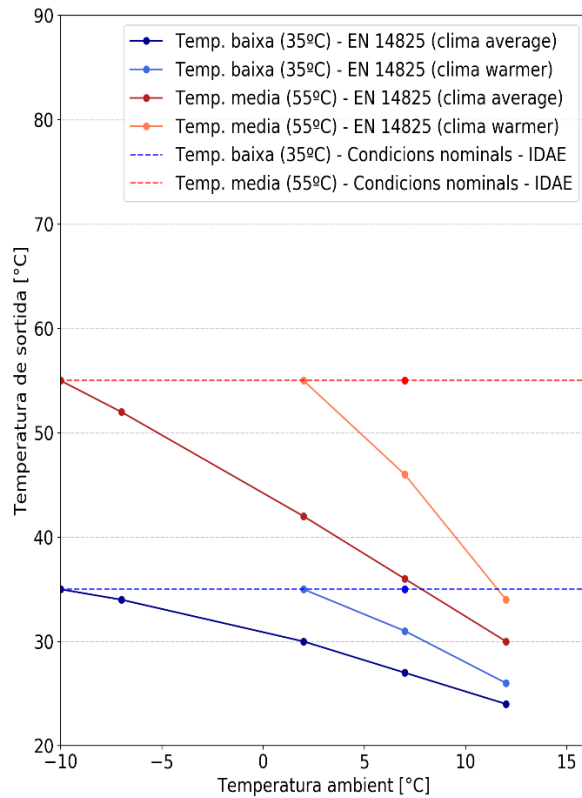
3.3.2. Corbes de regulació de calefacció

Segons és comunament conegut, el nivell de temperatura de sortida és un dels factors que més afecta el rendiment de la bomba de calor i el seu funcionament intern. Per això, es considera important definir les diferents configuracions que s'han fet servir entre les diferents metodologies pel que fa a les consignes de temperatura de treball (temperatura d'impulsió) de la bomba de calor (Figura 12).

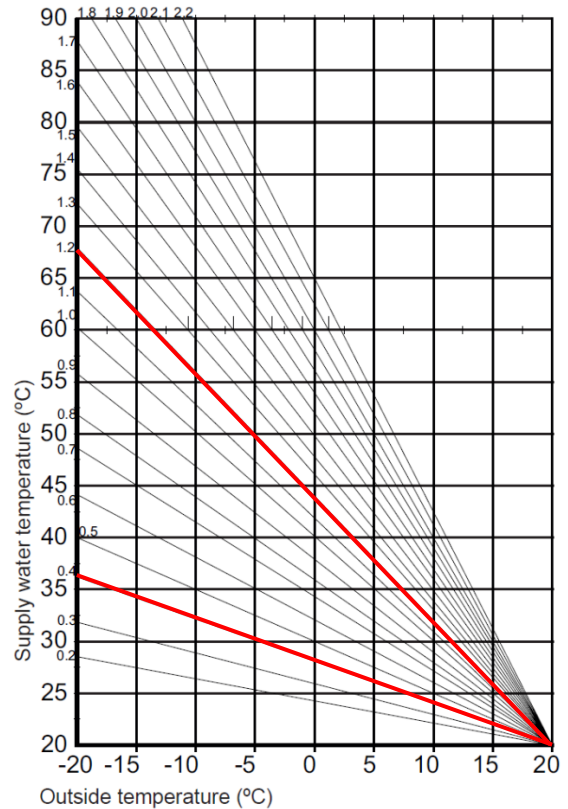
La normativa EN 14825 preveu un decrement de la temperatura de sortida en funció de la càrrega i, llavors, en funció de la temperatura ambient. Es considera una consigna de 55 °C al 100% de càrrega per a aplicacions de temperatura mitjana, com ara radiadors, i de 35 °C per a aplicacions de temperatura baixa, com el terra radiant. Després, la consigna va baixant a mesura que la temperatura ambient puja, depenent del clima que es tingui en compte.

La metodologia simplificada de l'IDAE només considera el rendiment de la bomba de calor en uns punts nominals, als quals s'apliquen uns coeficients de ponderació. Per tant, aquesta metodologia sols té en compte per clima un factor, que és la funció de la temperatura de treball de la bomba de calor, però considerant que aquesta és constant.

El ventall de corbes de calefacció que es poden seleccionar en el model de bomba de calor testejat es presenta a la Figura 12 (b). La corba de calefacció sempre té el punt 20-20 °C com a referència, i després es pot triar el pendent de la corba en funció de l'aplicació. A la configuració per defecte d'aquest model, es proposa una corba de pendent 1,2 per a aplicacions de radiadors i de 0,4 per a aplicacions de terra radiant (aquestes dues corbes es ressalten en la figura marcades en vermell).



(a) Corbes segons la norma EN 14825 i l'IDAE



(b) Corbes per defecte de la bomba de calor

Figura 12. Corbes de calefacció segons la norma (a) i tal com està configurat en el model de bomba de calor utilitzat (b)

3.3.3. Definició d'experiments de laboratori

Es realitzen experiments de laboratori per a la comparació entre el mètode de l'IDAE, els resultats de l'estàndard 14825:2018 i el mètode de seqüència de dies tipus. Els experiments sobre la base de l'estàndard EN 14825:2018 es duran a terme en les condicions *warmer* i *average*, que representen els perfils de calefacció dels climes B3 i E1, respectivament, amb dues temperatures de producció d'aigua calenta per a calefacció, 35 °C i 55 °C.

D'altra banda, per als experiments de dies tipus, es realitza una seqüència de quatre dies per a cada tipus d'emissor i clima, com es pot veure a la Taula 13. Cada seqüència inclou un dia en temps real de preconditionament del sistema (dia 0).

Taula 11. Experiments de clima *warmer* de l'estàndard EN 14825:2018

	Temp. ambient (°C)	Càrrega parcial (%)	Temperatura d'aigua de sortida de condensador (°C)
<i>Aplicació de temperatura mitjana</i>	2	100	55
	7	64	46
	12	29	34
<i>Aplicació de temperatura baixa</i>	2	100	35
	7	64	31
	12	29	26

Taula 12. Experiments de clima *average* de l'estàndard EN 14825:2018

	Temp. ambient (°C)	Càrrega parcial (%)	Temperatura d'aigua de sortida de condensador (°C)
<i>Aplicació de temperatura mitjana</i>	-10	100	55
	-7	88	52
	2	54	42
	7	35	36
	12	15	30
<i>Aplicació de temperatura baixa</i>	-10	100	35
	-7	88	34
	2	54	30
	7	35	27
	12	15	24

Taula 13. Seqüència d'experiments de dies tipus

Clima	Emissor	Seqüència de dies tipus				
		Dia 0	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4
B3 (Tarragona)	Radiador d'alumini	Dia 0_B3_RD	Dia 1_B3_RD	Dia 2_B3_RD	Dia 3_B3_RD	Dia 4_B3_RD
B3 (Tarragona)	Terra radiant	Dia 0_B3_RF	Dia 1_B3_RF	Dia 2_B3_RF	Dia 3_B3_RF	Dia 4_B3_RF
E1 (Puigcerdà)	Radiador d'alumini	Dia 0_E1_RD	Dia 1_E1_RD	Dia 2_E1_RD	Dia 3_E1_RD	Dia 4_E1_RD
E1 (Puigcerdà)	Terra radiant	Dia 0_E1_RF	Dia 1_E1_RF	Dia 2_E1_RF	Dia 3_E1_RF	Dia 4_E1_RF

4. Resultats mètode 1: Normativa EN 14825

4.1. Assaigs experimentals estàtics segons EN 14825

Els resultats dels assaigs estàtics es presenten a la Figura 13 per al clima *average* i es comparen amb les dades del fabricant. Els resultats numèrics es poden veure a les Taula 14 i 15. Per al clima *warmer*, els resultats es presenten gràficament a la Figura 14 i numèricament a les Taula 16 i 17. Cal destacar que, en el cas del clima *warmer*, no es disposa de dades del fabricant dels COP intermedis, només es proporciona el valor de rendiment final per a l'etiqueta energètica.

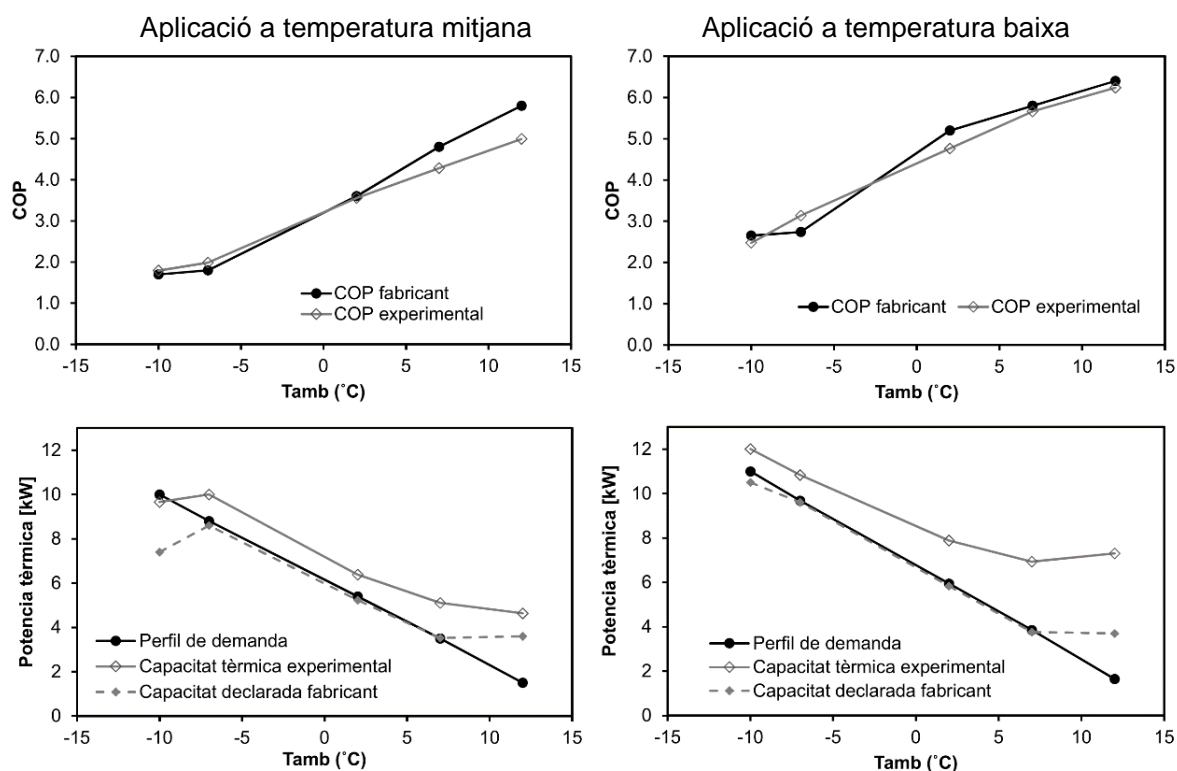


Figura 13. Assaigs estàtics segons la norma EN 14825 (només per al clima *average*)

Taula 14. Resultats assaigs estàtics experimentals per al clima *average* i aplicació de temperatura mitjana

Temperatura ambient	Càrrega	Càrrega aplicada	Potència experimental	Consigna temperatura de sortida variable	Consigna temperatura de retorn variable	COP fabricant	COP experimental
(°C)	(%)	(kW)	(kW)	(°C)	(°C)	(-)	(-)
-10	100	10	9,7	55	48,0	1,7	1,79
-7	88	8,8	10,0	52	45,8	1,8	1,99
2	54	5,4	6,4	42	38,2	3,6	3,56
7	35	3,5	5,1	36	33,5	4,8	4,28
12	15	1,5	4,6	30	28,9	5,8	4,99

Taula 15. Resultats assaigs estàtics experimentals per al clima *average* i aplicació de temperatura baixa

Temperatura ambient	Càrrega	Càrrega aplicada	Potència experimental	Consigna temperatura de sortida variable	Consigna temperatura de retorn variable	COP fabricant	COP experimental
(°C)	(%)	(kW)	(kW)	(°C)	(°C)	(-)	(-)
-10	100	11,0	12,0	35	30,0	2,7	2,48
-7	88	9,7	10,8	34	29,6	2,7	3,13
2	54	5,9	7,9	30	27,3	5,2	4,76
7	35	3,9	6,9	27	25,3	5,8	5,66
12	15	1,7	7,3	24	23,3	6,4	6,24

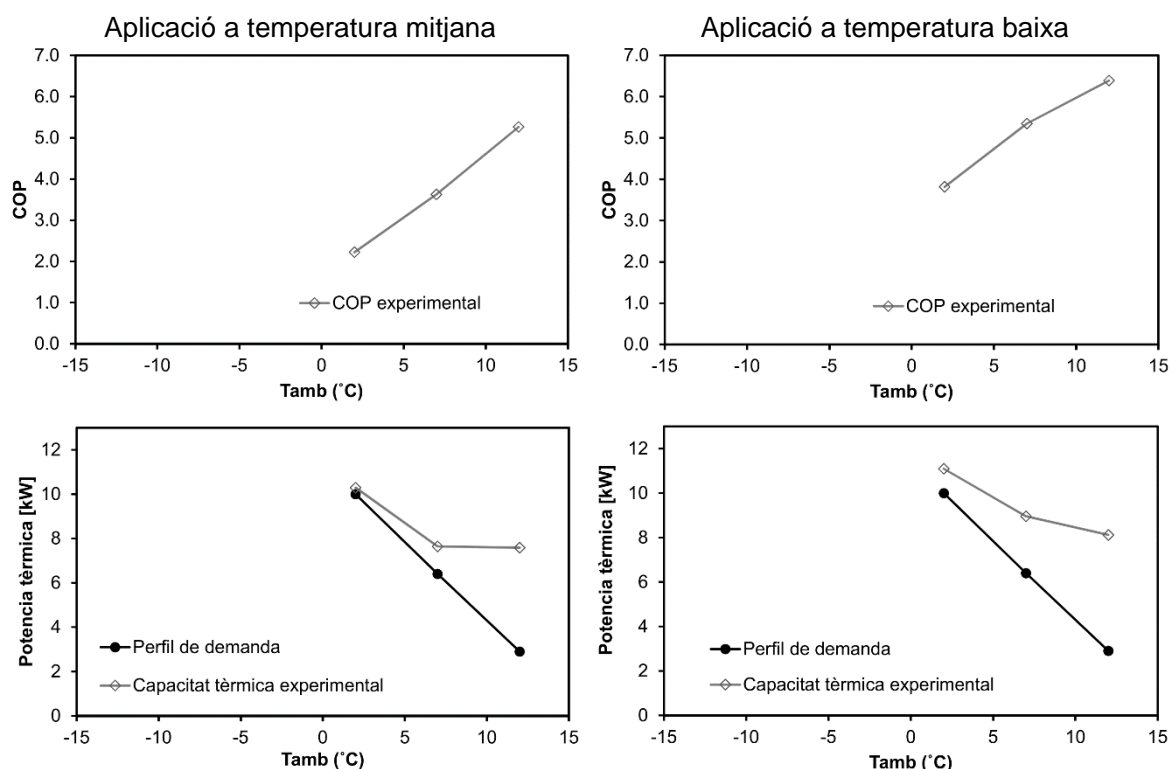


Figura 14. Assaigs estàtics segons la norma EN 14825 (només per al clima *warm*)

Nota: no hi ha dades del fabricant dels COP intermedis per al clima *warm*, contràriament al clima *average*.

Taula 16. Resultats assaigs estàtics experimentals per al clima *warm* i aplicació de temperatura mitjana

Temperatura ambient	Càrrega	Càrrega aplicada	Potència experimental I (estàtic)	Consigna temperatura de sortida variable	Consigna temperatura de retorn variable	COP experimental I
(°C)	(%)	(kW)	(kW)	(°C)	(°C)	(-)
2	100	10	10,3	55	48,0	2,22
7	64	6,4	7,6	46	41,5	3,63
12	29	2,9	7,6	34	32,0	5,26

Taula 17. Resultats assaigs estàtics experimentals per al clima *warmer* i aplicació de temperatura baixa

Temperatura ambient	Càrrega	Càrrega aplicada	Potència experimental (estàtic)	Consigna temperatura de sortida variable	Consigna temperatura de retorn variable	COP experimental
(°C)	(%)	(kW)	(kW)	(°C)	(°C)	(-)
2	100	10	11,1	35	30,5	3,81
7	64	6,4	9,0	31	28,1	5,34
12	29	2,9	8,1	26	24,7	6,91

4.2. Càlcul de l'SCOP

Sobre la base dels valors de COP obtinguts de manera experimental al laboratori, s'ha calculat el COP estacional d'acord amb la metodologia de la norma EN 14825, utilitzant el mètode de *bins* per extrapolar el rendiment de la bomba de calor a totes les situacions de càrrega parcial. Els resultats finals es presenten a la Taula 18 i es comparen amb els valors de COP estacional declarat pel fabricant.

Taula 18. Càlculs de l'SCOP segons el clima i el nivell de temperatura de sortida i comparació amb els valors declarats pel fabricant

Clima norma EN 14825 (CTE)	Aplicació de temperatura	Declarats pel fabricant		Valors experimentals propis	
		SCOP	Rendiment η_s i etiqueta	SCOP	Rendiment η_s i etiqueta
Average (~E1)	Mitjana	3,47	136% (A++)	3,31	130% (A++)
Average (~E1)	Baixa	4,75	187% (A+++)	4,36	171% (A++)
Warmer (~B3)	Mitjana	4,90	193% (A+++)	3,85	151% (A+++)
Warmer (~B3)	Baixa	6,05	240% (A+++)	5,20	205% (A+++)

Es pot observar que l'SCOP calculat amb els valors de COP propis sempre està per sota de l'SCOP declarat pel fabricant. En el clima més fred (*average*), la diferència és de només entre el 6% i el 16% del rendiment. Aquesta diferència produeix un canvi de categoria entre el valor del fabricant i el valor experimental: el fabricant declara una categoria A+++ per a aplicacions de temperatura baixa, mentre que, en realitat, s'ha observat una categoria A++ (encara que la diferència entre tots dos és petita).

En el cas del clima més càlid (*warmer*), s'observa una discrepància més gran entre els valors del fabricant i els valors obtinguts experimentalment. L'SCOP calculat té un valor de 0,8 fins a 1 punt menor que l'SCOP declarat pel fabricant. Malgrat aquesta diferència, l'avaluació dona la mateixa categoria d'eficiència energètica en tots els casos del clima més càlid: categoria A+++.

5. Resultats mètode 2: Metodologia simplificada IDAE

En aquesta part es presenten els resultats obtinguts en aplicar la metodologia simplificada de l'IDAE. Amb aquesta metodologia, no es pot considerar una temperatura de sortida variable amb la temperatura ambient, només es pot escollir entre aplicacions de temperatura mitjana (55 °C) o baixa (35 °C). El càlcul de l'SPF es basa en les dades de COP nominal proporcionades en el catàleg del fabricant. En aquest cas, la màquina té un COP de 3,0 a una temperatura de sortida de 55 °C, i de 5,0 a una temperatura de sortida de 35 °C. Com que el COP està donat amb les mateixes condicions de temperatura amb què la bomba de calor s'utilitza, el factor de correcció FC no té impacte. El factor FP té un valor diferent per a equips centralitzats, que solen ser més eficients, i per a equips individuals *split*, es presenten els resultats per als dos casos.

Els resultats es mostren a la Taula 19 per a aplicació de radiadors a 55 °C i a la Taula 20 per a aplicació de terra radiant a 35 °C. Les diferents zones climàtiques estan agrupades en dos grups diferents: els climes més càlids B3, C2 i C3, d'una banda, i els climes D1, D2, D3 i E1, d'altra banda. S'observa un SPF lleugerament millor en els climes més càlids, amb valors entre 0,12-0,15 (radiadors) i 0,20-0,25 (terra radiant) més alts que en els altres climes. Hi ha més variació entre els casos de temperatura de sortida diferent: el cas amb pitjor SPF correspon a un equip *split* en els climes més freds, amb un SPF d'1,92, mentre que un equip centralitzat en clima més càlid té un valor de COP dues vegades més alt, fins a un valor de 4.

Taula 19. Resultats de l'SPF a temperatura mitjana (radiadors) amb la metodologia simplificada de l'IDAE

Zona climàtica	FP		Aplicació de temperatura mitjana (55 °C)						
	Equips centralitzats	Equips <i>split</i>	COP nominal a 55 °C	Equips centralitzats			Equips tipus <i>split</i>		
				SPF	η_s	Etiqueta	SPF	η_s	Etiqueta
B3	0,8	0,68	3,00	2,40	93%	A	2,04	79%	C
C2, C3	0,8	0,68	3,00	2,40	93%	A	2,04	79%	C
D1, D2, D3	0,75	0,64	3,00	2,25	87%	B	1,92	74%	D
E1	0,75	0,64	3,00	2,25	87%	B	1,92	74%	D

Taula 20. Resultats de l'SPF a temperatura baixa (terra radiant) amb la metodologia simplificada de l'IDAE

Zona climàtica	FP		Aplicació de temperatura baixa (35 °C)						
	Equips centralitzats	Equips <i>split</i>	COP nominal a 35 °C	Equips centralitzats			Equips tipus <i>split</i>		
				SPF	η_s	Etiqueta	SPF	η_s	Etiqueta
B3	0,8	0,68	5,00	4,00	157%	A++	3,40	133%	A+
C2, C3	0,8	0,68	5,00	4,00	157%	A++	3,40	133%	A+
D1, D2, D3	0,75	0,64	5,00	3,75	147%	A+	3,20	125%	A+
E1	0,75	0,64	5,00	3,75	147%	A+	3,20	125%	A+

6. Resultats mètode 3: Dies tipus experimentals

6.1. Dies tipus amb radiadors

En primer lloc s'analitza el cas del clima E1 amb els radiadors. Els resultats es presenten a la Figura 15 en forma de sèries temporals dels paràmetres següents: temperatura ambient de l'aire (a la cambra climàtica), consum de la bomba de calor, producció de calor tant per a calefacció com per a ACS, temperatura mitjana de l'habitatge, temperatura del tanc d'ACS i, finalment, temperatura de sortida i la seva consigna. Els diferents nivells de càrrega es poden identificar en els diferents dies tipus. El primer dia (22 de febrer) té una càrrega menor, amb activacions de la bomba de calor només al matí i a la tarda. En canvi, l'últim dia presenta una càrrega més gran, perquè la temperatura ambient d'aquest dia és bastant baixa, inferior a -5 °C. Per sota del punt bivalent, s'activa la resistència elèctrica per a la calefacció: es tracta de tres nivells successius de 2 kW, llavors arriben a 6 kW, com es pot veure en els pics al segon gràfic de la Figura 15.

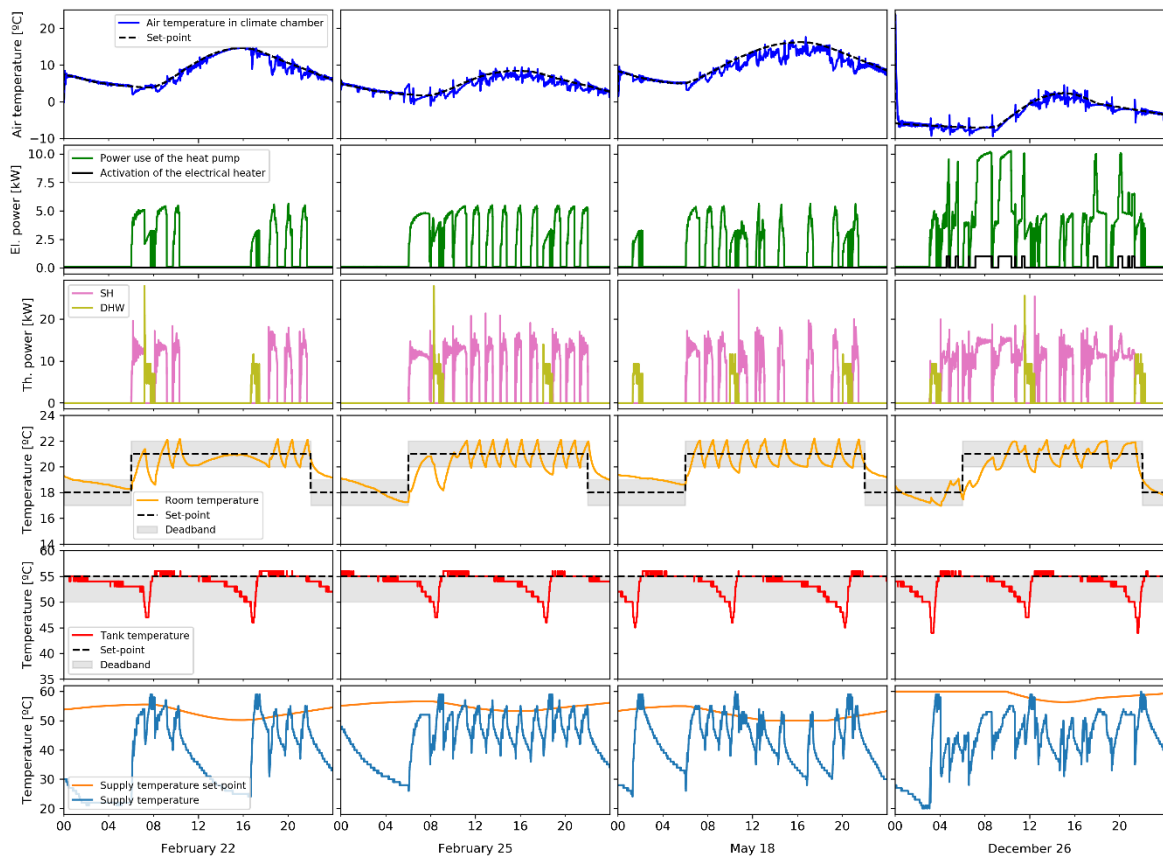


Figura 15. Dies tipus per al cas del clima E1 amb radiadors

Per obtenir la càrrega total de calefacció i ACS de l'any, com també el consum elèctric de la bomba de calor per cobrir aquesta demanda, s'extrapola la càrrega dels quatre dies tipus. La ràtio entre aquestes quantitats és l'SCOP, que en aquest cas és 2,32. És un valor relativament baix, sobretot a causa de l'ús de les resistències elèctriques els dies més freds de l'any i d'usar la bomba de calor al seu límit alt en termes de temperatura de sortida (entre 50 °C i 60 °C).

Els resultats per al clima B3 es mostren a la Figura 16. En aquest clima, no es necessiten les resistències elèctriques, ja que la bomba de calor pot cobrir la demanda sola, fins i tot els dies més freds. L'últim dia presenta una càrrega bastant baixa, amb activació del circuit de calefacció

només al matí. L'extrapolació dels dies tipus del clima B3 a l'any sencer dona un SCOP de 2,37. Aquest valor està molt a prop del que s'ha observat prèviament en el clima E1, la qual cosa suggereix que el nivell de temperatura imposat a la bomba de calor té més influència que el clima en el rendiment.

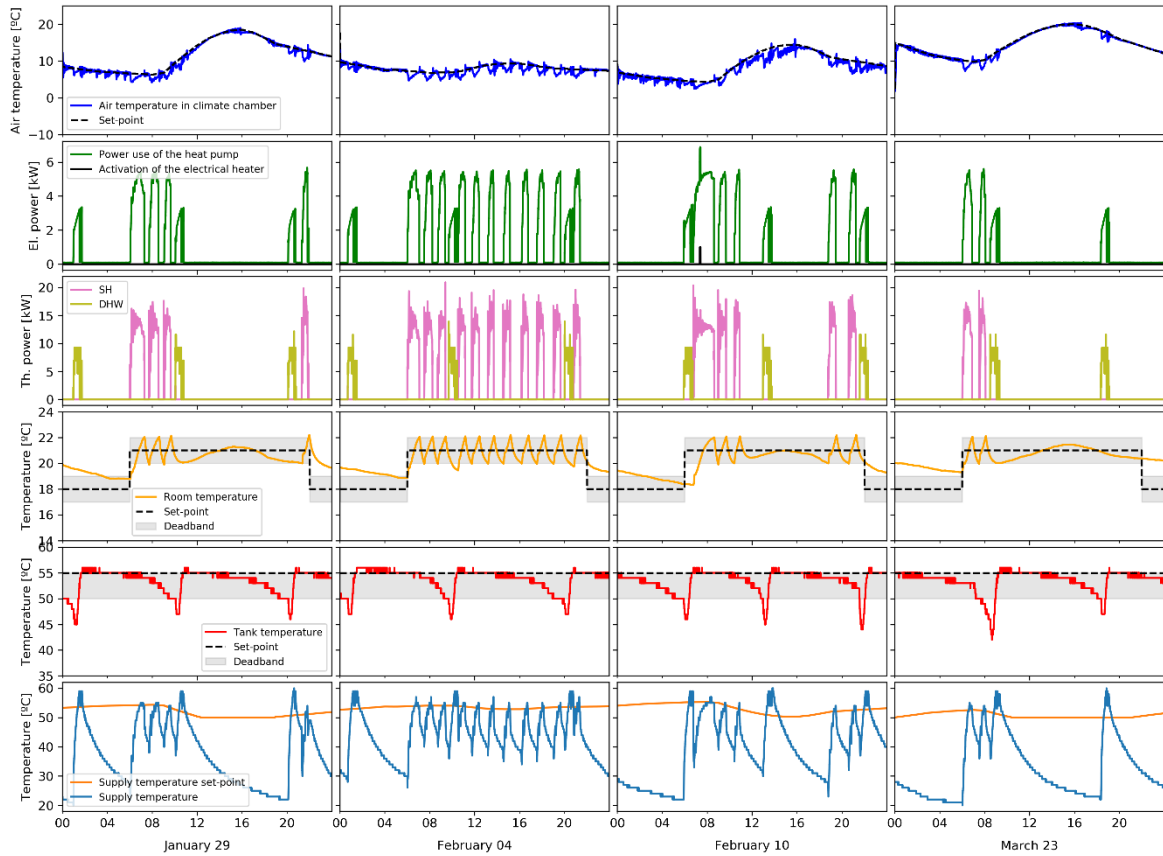


Figura 16. Dies tipus per al cas del clima B3 amb radiadors

6.2. Dies tipus amb terra radiant

Amb el terra radiant com a sistema emissor, els resultats dels dies tipus experimentals en el clima B3 es presenten a la Figura 17. El terra radiant té una inèrcia més gran que els radiadors; per tant, l'evolució de la temperatura a l'habitatge és més suau. Com que la temperatura demandada a la bomba de calor és també força més baixa, la bomba de calor funciona a càrrega baixa la majoria del temps, amb un rendiment més alt. Quan la demanda baixa massa, el circuit de calefacció segueix actiu (la bomba d'impulsió), però el compressor entra en cicles *on-off*. En algun cas, com en l'últim dia, la demanda és molt baixa i la corba de calefacció en aquest cas dona una consigna de temperatura de sortida també molt baixa, pocs graus per sobre dels 20 °C. Com que aquesta consigna és molt propera a la temperatura a l'habitatge, el controlador intern de la bomba de calor considera inútil encendre el compressor, encara que la bomba de calor segueixi estant encesa i se li demani calefacció. Això és un efecte advers de la corba de calefacció baixa: amb una corba de calefacció més «agressiva», l'habitatge s'hauria escalfat més ràpidament, sortint de la *deadband* i, per tant, apagant la bomba de calor.

L'SCOP en aquest cas és de 4,10. Tot i que la bomba de calor en general funciona més temps que en els casos previs amb radiadors, s'aprecia que l'SCOP té un valor bastant més alt. Això és degut, en gran part, a un nivell de temperatura de consigna més baix que fa treballar la bomba de calor en condicions més eficients. Els cicles *on-off* del compressor sembla que no

perjudiquen gaire el rendiment, encara que sense aquest comportament es podria assolir nivells d'SCOP encara més alts, com els resultats teòrics vistos amb la norma EN 14825.

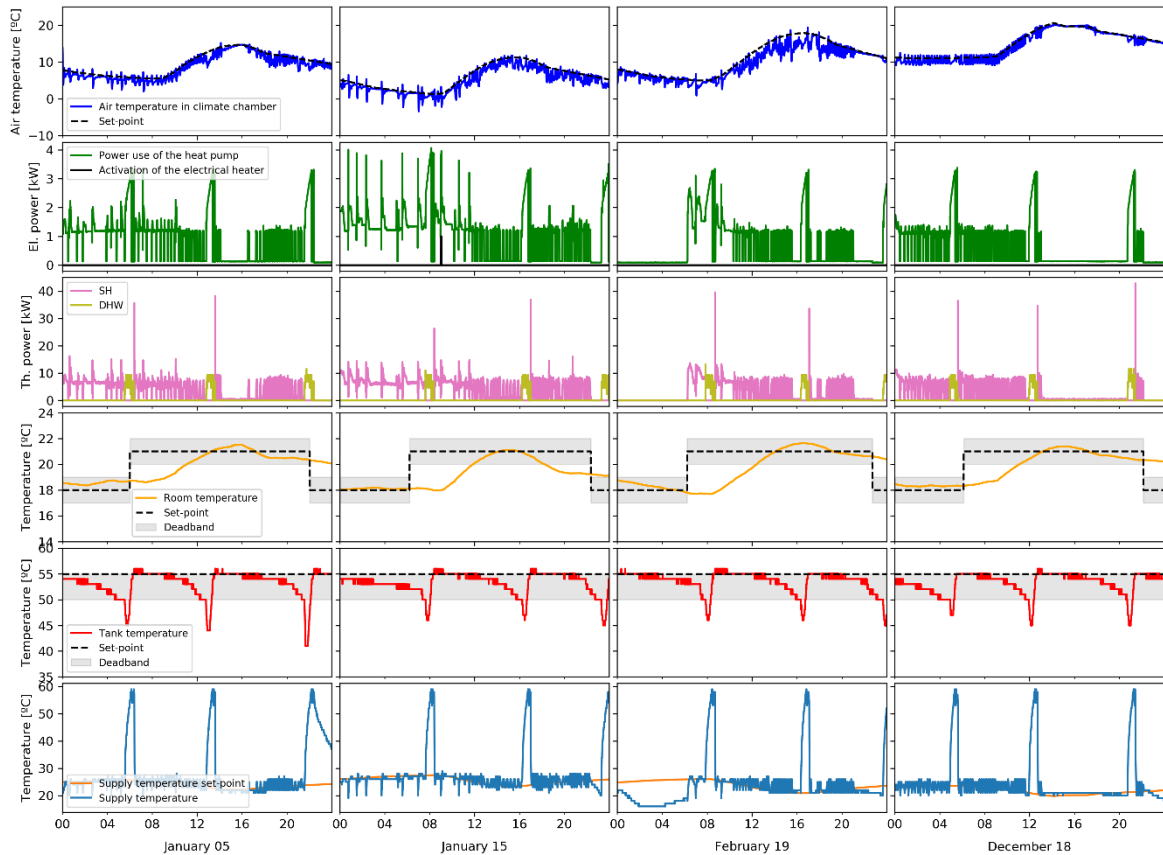


Figura 17. Dies tipus per al cas del clima B3 amb terra radiant

Els resultats dels dies tipus experimentals amb terra radiant per al clima E1 es presenten a la Figura 18. Es pot veure que la bomba de calor està activa cada dia durant tot el període de consigna de temperatura a l'habitatge més alta (sense el *set-back* de nit), però a càrrega bastant baixa. La corba de calefacció té un pendent força baix (valor de 0,5) i la consigna de temperatura de sortida varia suauement, en un rang entre 25 °C i 36 °C. El compressor entra en mode de cicles *on-off* molt freqüents només el dia més càlid, el 13 de maig. La resta de dies, l'operació del sistema és més normal i contínua. Com que la consigna de temperatura de sortida és força baixa, l'ús de la resistència elèctrica és gairebé inexistent en aquesta configuració, ja que el compressor pot arribar sol al nivell de temperatura desitjat. La resistència elèctrica només s'activa una vegada, el dia més fred, 25 de gener, per assolir la consigna quan s'arrenca la calefacció.

En el cas del clima E1 amb terra radiant, el valor d'SCOP observat és de 3,96, lleugerament més baix que en el clima B3 a causa d'unes condicions ambientals més dures, però segueix tenint un nivell d'eficiència molt alt.

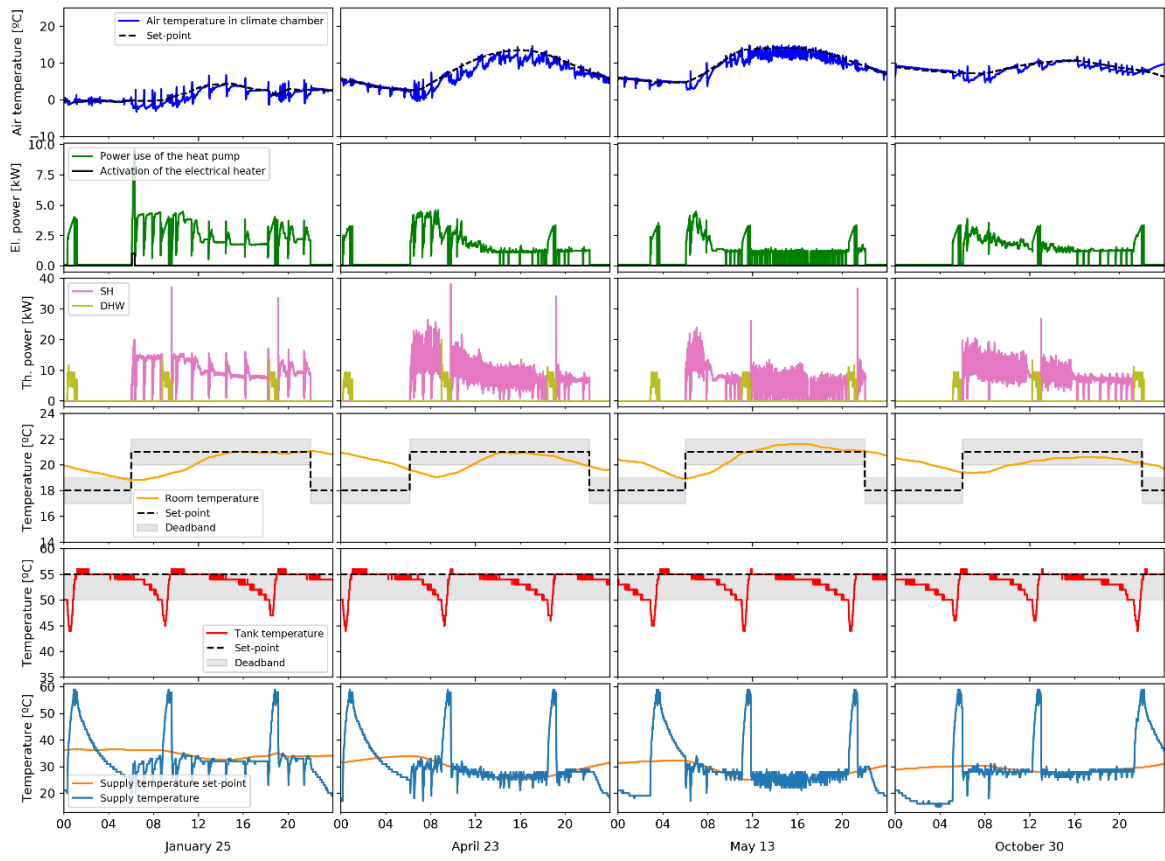


Figura 18. Dies tipus per al cas del clima E1 amb terra radiant

7. Resultats mètode 4: Simulacions anuals

7.1. Simulacions efectuades

En el marc d'aquest estudi, s'ha dut a terme una sèrie de simulacions dinàmiques anuals per avaluar el rendiment de la instal·lació de bomba de calor en totes les situacions que es puguin trobar a Catalunya. En total, s'han considerat les combinacions següents:

- les set zones climàtiques a Catalunya,
- els tres sistemes emissors diferents, que corresponen a diferents nivells de temperatura d'impulsió,
- les dues configuracions de consigna per a la temperatura de sortida (una constant, l'altra amb una corba de calefacció).

Els valors escollits per a cada un d'aquests tres paràmetres s'indiquen a la taula 21. Combinant totes les possibilitats de combinació entre les tres variables, s'han fet un total de quaranta-dues simulacions anuals.

Taula 21. Paràmetres variats a les simulacions

Climes	Emissors i consigna de temperatura de sortida	Nomenclatura (exemple)	
B3, C3, C2, D3, D2, D1, E1	Radiadors (RD)	55 constant (55)	B3_RD_55
		Corba 1,5 (CC15)	C2_RD_CC1
	Radiadors baixa temp. (RBT)	45 constant (45)	C3_RBT_45
		Corba 1,2 (CC12)	D3_RBT_CC12
	Terra radiant (TR)	35 constant (35)	D2_TR_35
		Corba 0,5 (CC05)	D1_TR_CC05

Per poder aprofitar el model matemàtic detallat de la bomba de calor i del seu control intern, les simulacions anuals es realitzen amb un pas de temps molt petit, concretament d'un minut. Per a cada simulació, se sumen el consum elèctric de la bomba de calor i la producció d'aigua calenta (tant per a calefacció com per a ACS) durant tota la temporada d'hivern. La ràtio entre aquestes quantitats dona el COP estacional, que es pot comparar amb els valors obtinguts amb els altres mètodes.

7.2. Simulacions amb radiadors (temperatura mitjana)

Els resultats d'SCOP per als casos amb radiadors s'indiquen a la taula 22. Els exemples amb temperatura de consigna constant de 55 °C tenen un SCOP bastant semblant, independentment del clima, entre 2,1 i 2,4. El valor més baix és el del clima més fred (E1), en què les resistències elèctriques s'han d'encendre durant uns dies. Quan s'utilitza la corba de calefacció, la temperatura d'impulsió disminueix de manera important en funció de la temperatura ambient i, per tant, la bomba de calor treballa de manera més eficient durant la major part de l'any. Això es reflecteix en l'SCOP, que té valors entre 3,2 i 3,7, excepte en el cas del clima E1, que només té un valor de 2,8, a causa una altra vegada de l'ús de les resistències elèctriques.

Taula 22. Valors d'SCOP de les simulacions anuals amb radiadors

SCOP	Consigna de temperatura de sortida		
	Clima	Constant = 55 °C	Corba de calefacció de pendent = 1,5
B3		2,31	3,47
C3		2,31	3,47
C2		2,37	3,69
D3		2,33	3,52
D2		2,22	3,20
D1		2,24	3,23
E1		2,12	2,77

7.3. Simulacions amb radiadors de baixa temperatura (temperatura intermèdia)

Els resultats d'SCOP per als casos amb radiadors de baixa temperatura s'indiquen a la taula 23. Els valors d'SCOP amb una temperatura de sortida constant de 45 °C són lleugerament més alts que amb els radiadors d'alta temperatura a 55 °C, i estan compresos en un rang entre 2,5 i 2,8. Amb una temperatura de sortida regulada per la corba de calefacció, l'SCOP és més alt i presenta valors molt similars als del radiador normal, tot i que la corba de calefacció té un pendent diferent (1,2 per a radiadors de baixa temperatura, 1,5 per als radiadors normals).

Taula 23. Valors d'SCOP de les simulacions anuals amb radiadors de baixa temperatura

SCOP	Consigna de temperatura de sortida		
	Clima	Constant = 45 °C	Corba de calefacció de pendent = 1,2
B3		2,69	3,44
C3		2,69	3,44
C2		2,80	3,67
D3		2,74	3,53
D2		2,62	3,23
D1		2,65	3,30
E1		2,47	2,77

7.4. Simulacions amb terra radiant (baixa temperatura)

Els resultats d'SCOP per als casos amb terra radiant s'indiquen a la taula 24. Els valors d'SCOP per al cas de temperatura d'impulsió constant (35 °C) estan inclosos en un rang relativament estret, igual que en el cas de temperatura més alta (55 °C), però a un nivell més alt: estan compresos entre 3,0 i 3,2. Amb el terra radiant com a emissor, es demana una temperatura menys càlida que amb els radiadors i, per tant, no cal recórrer a l'ús de les resistències elèctriques. Així, el clima més fred presenta resultats més propers als dels altres climes.

Quan la consigna de temperatura de sortida segueix la corba de calefacció de pendent 0,5, l'SCOP té valors entre 3,9 i 4,4. Sorprenentment, el clima més fred presenta un dels millors valors de l'SCOP, en comparació amb els altres climes. Com s'ha pogut observar en els experiments, en els climes més càlids, la bomba de calor treballa a càrrega molt baixa, fent cicles *on-off*, fet que pot perjudicar el seu rendiment. S'evidencia que una aplicació de terra radiant amb temperatura de sortida variable en un clima més fred és l'opció més òptima per a la bomba de calor.

Taula 24. Valors d'SCOP de les simulacions anuals amb terra radiant

SCOP	Consigna de temperatura de sortida	
	Constant = 35 °C	Corba de calefacció de pendent = 0,5
B3	3,03	4,04
C3	3,03	4,04
C2	3,21	4,39
D3	3,14	4,27
D2	2,88	3,98
D1	2,96	4,14
E1	2,95	4,31

7.5. Resum de les simulacions anuals

La figura 19 resumeix gràficament els diferents valors de l'SCOP en tots els casos simulats. Es pot apreciar que el rendiment estacional d'aquest tipus d'equip pot variar bastant segons el clima i el tipus de sistema emissor (i, per tant, el nivell de temperatura aplicat): des d'un 2,3 fins a un 4,4. Així mateix, s'observa que la configuració de control de la temperatura d'impulsió té una influència més gran en el rendiment que el clima exterior, encara que el clima també hi influeixi.

Els valors de l'SCOP extrapolats des dels dies tipus experimentals han estat representats amb estrelles vermelles en el mateix gràfic. Es pot observar una bona correlació entre aquests valors experimentals i els de les simulacions anuals, cosa que confirma l'adequació del model detallat de bomba de calor i de la metodologia dels dies tipus.

A la figura es pot veure que els sistemes que utilitzen una temperatura de sortida fixa tenen un SCOP ordenat per temperatura de sortida. Primer, l'SCOP de la configuració de radiadors amb temperatura de 55 °C és el més baix. Després, l'SCOP augmenta amb els radiadors de baixa temperatura, que tenen una temperatura de sortida de 45 °C, i augmenta encara més amb el terra radiant, que té una temperatura de sortida de 35 °C. Aquest ordre és lògic si es considera l'eficiència observada en els diferents nivells de temperatura, en els assaigs estàtics, per exemple.

Per als sistemes que utilitzen la regulació amb corba de calefacció, aquest ordre no és tan sistemàtic. En aquesta configuració, els radiadors, de baixa o alta temperatura, tenen un SCOP molt similar i gairebé igual en tots els climes, tot i que tenen una corba de pendent lleugerament diferent. El fet de canviar d'una temperatura de sortida constant a una corba de calefacció produeix un efecte benèfic en l'eficiència, però després el fet de canviar el pendent d'aquesta corba té pocs efectes. El salt més important s'observa amb el terra radiant en el clima E1, en què passar d'una temperatura constant de 35 °C a una corba de calefacció de pendent 0,5 produeix un augment en l'SCOP de +1,4 (des de 2,95 fins a 4,31).

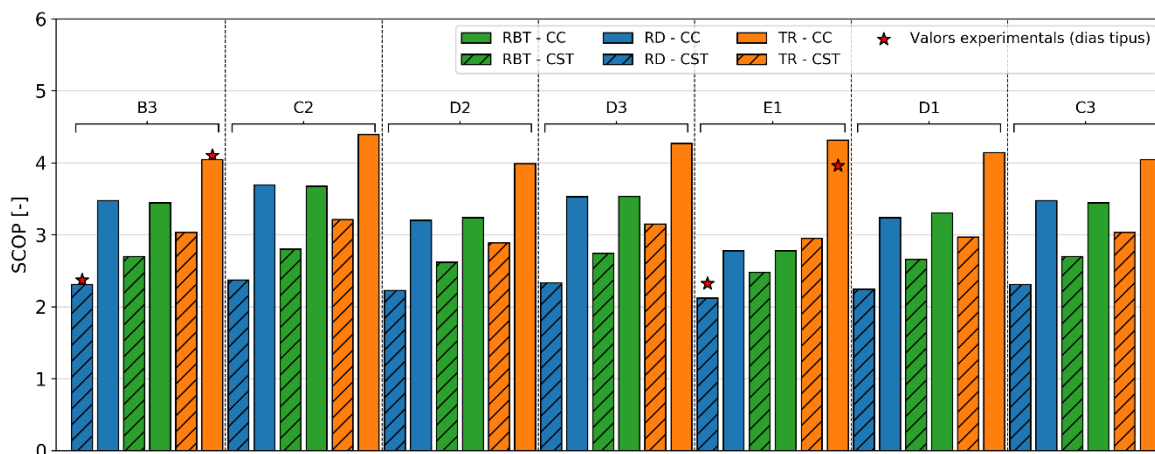


Figura 19. Representació dels SCOP en funció del clima, de l'emissor i de la consigna de temperatura de sortida

RD = Radiadors, RBT = Radiadors de baixa temperatura, TR = Terra radiant, CST = Temperatura de sortida constant, CC = Corba de calefacció.

Les disparitats geogràfiques es poden observar a la Figura 20. En els casos en què la temperatura de sortida és constant i no depèn del clima (RD_55 i TR_35), no s'observa diferència geogràfica entre les zones. El cas que destaca més disparitats geogràfiques és el de radiadors, amb una corba de calefacció molt abrupta, de pendent 1,5. En aquest cas, el clima dicta en quina zona de la corba s'ha d'operar, i, per tant, hi ha diferències notables d'SCOP entre les zones més càlides de la costa catalana (SCOP de 3,5) i la zona de l'interior al Pirineu (SCOP de 2,8).

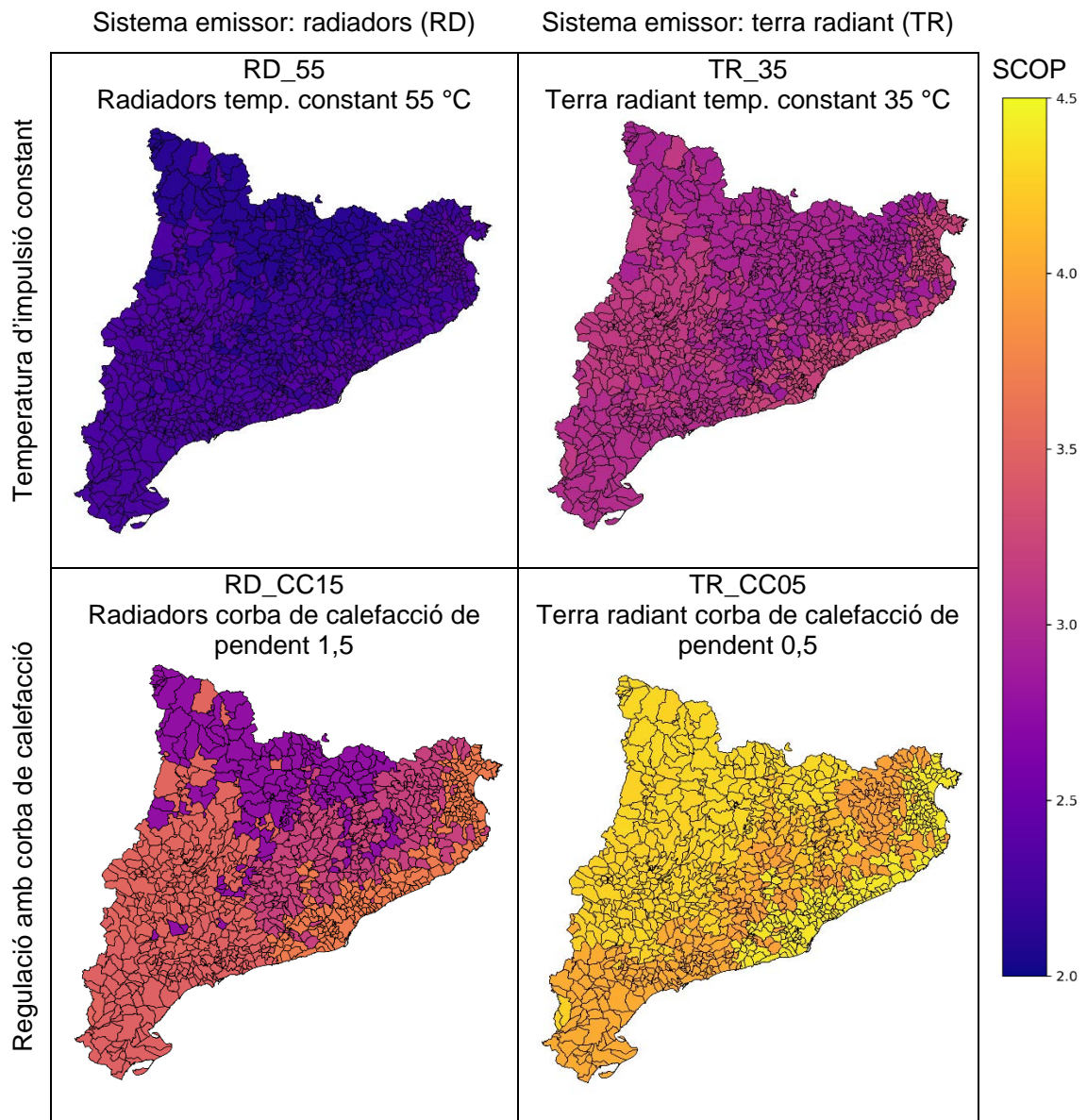


Figura 20. Representació de l'SCOP en funció de les zones climàtiques de Catalunya, per als quatre casos més extrems

8. Anàlisi econòmica

Més enllà de l'estudi de rendiment estacional, s'ha de considerar el cost total que ocasionen els sistemes de bomba de calor, en comparació amb altres sistemes de referència com la caldera de condensació. Per fer-ho, s'ha utilitzat l'índex de cost total per a l'usuari (CTU), tal com està definit per l'Institut Català d'Energia (ICAEN) i l'Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (ITeC).

El càlcul del CTU per a sistemes de generació de calor es basa en la fórmula següent:

$$CTU = Q_{\text{anual}} \cdot c_{\text{energia}} + c_{\text{manteniment}} + \frac{c_{\text{inversió}}}{v_{\text{útil}}}$$

En què el CTU s'indica en €/any per a l'usuari; Q_{anual} correspon a la demanda anual d'energia; c_{energia} és el preu de l'energia en €/kWh (gas o electricitat segons el mitjà portador d'energia); $c_{\text{manteniment}}$ correspon als costos de manteniment en €/any; $c_{\text{inversió}}$ és el preu de l'adquisició inicial del sistema en €, i $v_{\text{útil}}$ és la vida útil de l'equip en anys. Aquests paràmetres varien segons el sistema estudiat, i els seus valors considerats es mostren a la taula 25.

Taula 25. Valors dels paràmetres per al càlcul del CTU amb bomba de calor, caldera de condensació de gas o caldera de gas amb solar tèrmica

		Bomba de calor	Caldera de condensació	Caldera + solar tèrmica
		Electricitat	Gas natural	Gas natural
Preu de l'energia	€/kWh	0,141	0,058	0,058 (caldera)
Vida útil equip	anys	20	16	16 (ambdós)
Rendiment	-	SCOP variable	95%	95% (caldera)
Preu d'adquisició	€	7.541	1.967	1.967 (caldera) + 3.200 (solar t.)
Manteniment	€/any	150	150	250 (ambdós)

En el cas de la bomba de calor, la demanda anual d'energia, Q_{anual} , és el consum elèctric anual de la bomba, que prové de les simulacions anuals detallades, i es multiplica després pel preu de l'electricitat. Com que el consum elèctric anual de la bomba de calor depèn del sistema emissor i de la configuració de la temperatura de sortida, s'han obtingut sis valors del CTU per a cada clima, cada un correspon a cada simulació detallada.

En el cas de la caldera de gas, s'ha considerat la demanda tèrmica anual de l'habitatge a la simulació anual detallada amb radiadors, dividida pel rendiment anual de la caldera (95%) i, després, s'ha multiplicat pel preu del gas natural.

El tercer cas analitza el conjunt d'una caldera de gas amb un sistema solar tèrmic per a la producció d'ACS. Per a l'anàlisi econòmica, s'ha considerat una fracció solar dependent del mes, com es pot veure a la Taula 26. El sistema solar tèrmic cobreix el percentatge de la demanda mensual d'ACS segons els valors de la taula, mentre que la resta està produït amb la caldera de gas, com també la demanda de calefacció. En l'anàlisi del cost, la part produïda pels panells solars no es té en compte, mentre que la resta de consum (resta d'ACS més calefacció) es considera que es cobreix amb el que s'ha subministrat amb gas. El preu d'adquisició inclou la caldera (1.967 €) més el sistema solar (3.200 €), i el preu de manteniment és més alt (250 €), perquè inclou el manteniment dels dos sistemes.

Taula 26. Fracció solar en funció del mes de l'any (generat amb l'eina CHEQ4 de l'IDAE)

GN	FB	MÇ	AB	MG	JN	JL	AG	ST	OC	NV	DS
47%	54%	62%	66%	68%	72%	78%	74%	67%	56%	48%	44%

Els resultats del càlcul del CTU es presenten a la Figura 21 en forma de gràfics de barres. Es pot observar que, en la majoria dels diferents climes de Catalunya (B3, C2, C3, D2 i D3), un sistema de bomba de calor pot ser tan econòmic com un sistema amb caldera. La configuració de bomba de calor més econòmica sempre és la de terra radiant amb una corba de calefacció, perquè és també la configuració més eficient. En aquests climes, la bomba de calor amb terra radiant i corba de calefacció és entre un 0 i un 10% més barata que la caldera.

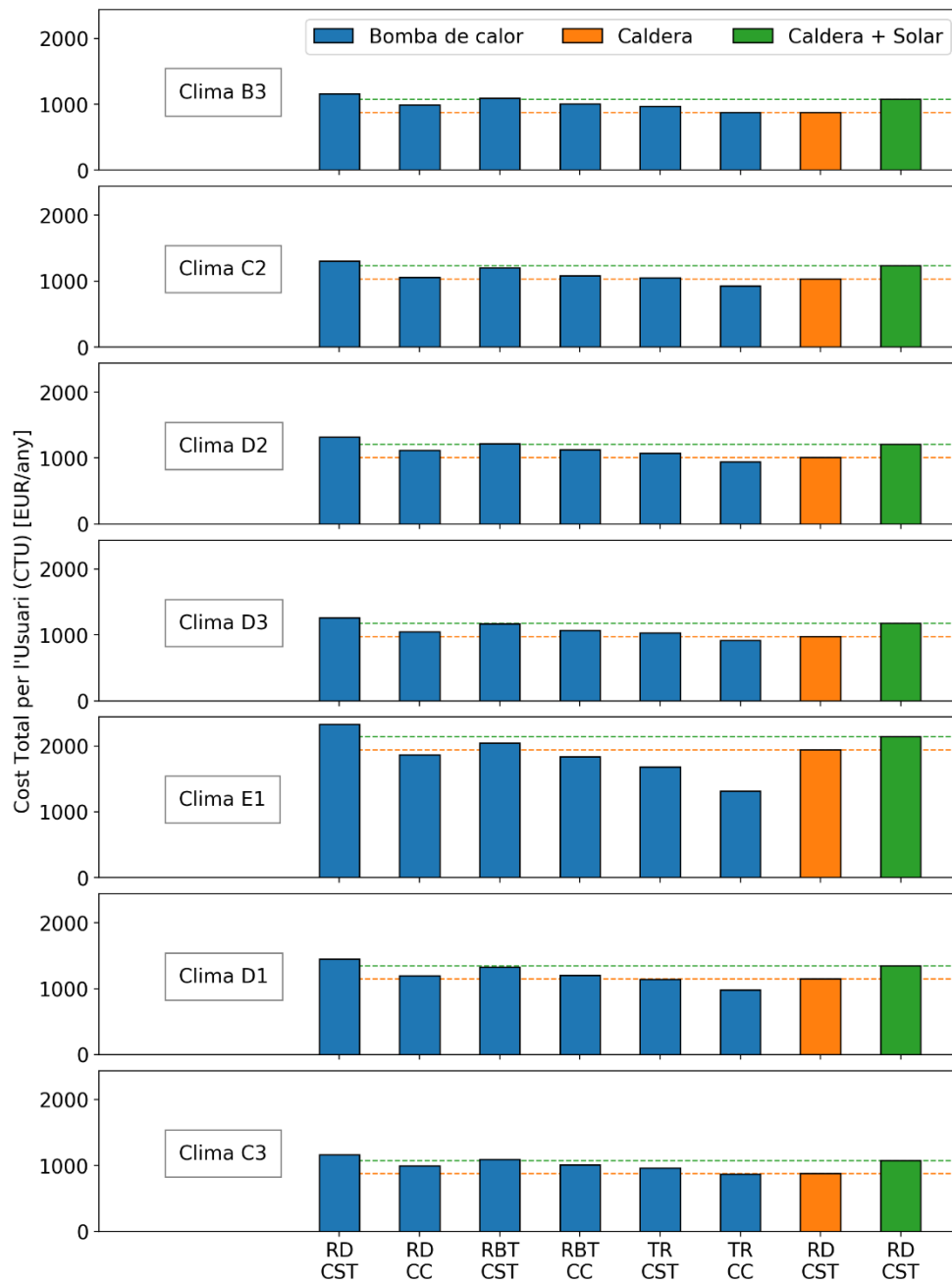


Figura 21. Representació del CTU per a tots els casos estudiats

RD = Radiadors, RBT = Radiadors de baixa temperatura, TR = Terra radiant, CST = Temperatura de sortida constant, CC = Corba de calefacció.

Les línies horitzontals discontinües donen la referència del CTU en el cas de la caldera o caldera amb sistema solar per visualitzar en quins casos el sistema amb bomba de calor surt més econòmic (valors del CTU).

En el clima D1 i, especialment, en el clima E1 els valors del CTU són més elevats que en els altres climes, a causa que la demanda de calefacció és més alta. La bomba de calor és bastant competitiva amb la caldera. Amb la configuració de terra radiant i corba de calefacció, el CTU

de la bomba de calor pot arribar a ser entre un 15% i un 25% més barat que una caldera en aquests climes.

A continuació, s'analitza el sistema de caldera amb panell solar tèrmic. Es pot apreciar que aquesta combinació, tot i que és una opció més sostenible, suposa un cost entre un 10% i un 23% més alt que la caldera de gas sola. Això es deu a un preu d'adquisició bastant més alt, ja que consta dels dos sistemes (caldera i panell solar tèrmic), i a un preu de manteniment també més alt. La reducció del consum de gas és provocada per la producció d'aigua calenta per part del sistema solar tèrmic, però aquesta baixada del cost operatiu no compensa l'increment del cost d'adquisició. El conjunt de caldera amb sistema solar té un cost total per a l'usuari equivalent a l'opció amb bomba de calor i radiadors de baixa temperatura a 45 °C, en gairebé tots els casos. Per tant, diverses configuracions amb bombes de calor surten més econòmiques, especialment amb terra radiant o amb l'ús d'una corba de calefacció en la regulació.

La taula completa amb els resultats del càlcul del CTU es pot trobar a l'annex 1. A la Taula 27, es mostra un extracte d'aquesta taula per analitzar més el detall dels diferents elements que componen el CTU. En aquesta taula s'han triat els climes més extrems, B3 i E1 (els mateixos que s'han triat per als estudis experimentals), i els radiadors i terra radiant com a sistemes emissors amb corba de calefacció, ja que aquesta configuració és la que és més eficient i té més sentit segons l'estudi previ sobre l'SCOP.

A la taula es pot observar que, en general, la bomba de calor pot ser un sistema de producció de calor d'un cost igual o més econòmic que la caldera. La diferència més gran és el cost d'adquisició: tot i que una bomba de calor té una vida útil més llarga que una caldera (20 anys respecte de 16 anys), el seu cost d'adquisició inicial és tres vegades més car a l'any que el d'una caldera (377 €/any respecte de 123 €/any). Per matisar aquesta important diferència de cost inicial, s'hauria de considerar que la bomba de calor també pot subministrar refrigeració per a la climatització a l'estiu, cosa que un sistema de caldera no pot oferir. Això pot explicar una part del cost inicial més elevat de la bomba de calor, ja que un usuari de caldera hauria d'invertir addicionalment en un altre sistema per a la climatització a l'estiu. Una altra cosa a tenir en compte és que el mercat de les bombes és actualment molt dinàmic, amb un creixement del 12% a l'any el 2016 a Europa (7% a Espanya, últimes dades disponibles de l'Associació Europea de Bombes de Calor, EHPA [17]). Per tant, amb un increment de les vendes, la maduració d'aquest mercat i les innovacions tecnològiques en aquests productes, es pot esperar una estabilitat en el preu de venda de les bombes de calor.

Taula 27. Càlcul del CTU per a alguns casos dels climes B3 i E1 (la taula completa es pot trobar a l'annex 1) i comparació amb casos de caldera

Clima	Sistema	Emissor	Cost d'adquisició	Cost energia anual	Manteniment	CTU	Variació CTU a/ caldera
-	-	-	€/any	€/any	€/any	€/any	
B3	Bomba de calor	RD_CC	377,1	467,0	150,0	994,1	+13,3%
		TR_CC	377,1	347,4	150,0	874,5	-0,3%
	Caldera	RD	122,9	604,6	150,0	877,5	0%
	Caldera + solar	RD	322,9	504,6	250,0	1.077,5	+22,8%
E1	Bomba de calor	RD_CC	377,1	1.340,3	150,0	1.867,4	-3,9%
		TR_CC	377,1	783,0	150,0	1.310,1	-32,6%
	Caldera	RD	122,9	1.669,8	150,0	1.942,7	0%
	Caldera + solar	RD	322,9	1.568,1	250,0	2.141,0	+10,2%

El preu de manteniment anual s'ha considerat igual per a la bomba de calor i la caldera (150 €/any). En canvi, el cost d'operació de la bomba de calor (ús anual d'energia) és més barat que per a una caldera. La ràtio entre els preus de l'electricitat i del gas natural és de 2,4 en el cas considerat, però, com que una bomba de calor en els climes de Catalunya gairebé sempre pot arribar a un SCOP superior a 3 (amb ús de corba de calefacció), la bomba de calor fa servir tres vegades menys energia que la caldera; per tant, la bomba de calor, malgrat la diferència de preus per kWh entre gas i electricitat, és el sistema més beneficiós. A més, s'hi pot afegir que, amb una gestió intel·ligent que s'aprofita del preu variable de l'electricitat i dels emmagatzematges tèrmics de l'edifici (massa tèrmica i tanc d'aigua calenta sanitària), es pot reduir encara més el cost de l'energia per a una bomba de calor [6].

En el cas de la bomba de calor aerotèrmica, el cost de l'energia elèctrica arriba a ser de fins al 60% o el 80%, aproximadament, del cost CTU. Aquest percentatge tan elevat depèn en gran mesura d'una variable força incerta, que és el preu de l'energia elèctrica. A mesura que s'incrementi el nombre d'instal·lacions d'energia renovable, que és la previsió per a la pròxima dècada, és possible que el preu del mercat elèctric, en el futur, tendeixi a la baixa i, per tant, disminueixi el CTU d'una bomba de calor aerotèrmica.

9. Conclusions

L'estudi ha permès comparar i analitzar el rendiment de bombes de calor aerotèrmiques combinades per donar servei de calefacció i d'ACS en condicions reals de funcionament (mitjançant experiments en laboratori semivirtual i simulacions dinàmiques anuals) i compararlo amb el mètode utilitzat per a la certificació dels rendiments dels equips per a calefacció (EN 14825) i el mètode simplificat per l'IDAE. La

Taula 28 resumeix els resultats obtinguts per als dos climes extrems de Catalunya (B3 i E1) i per a dos tipus d'emissors diferents (radiadors i terra radiant, per a aplicacions a temperatura mitjana i baixa temperatura, respectivament).

Taula 28. Valors d'SCOP segons diverses metodologies

Emissor	Clima	EN 14825		EN 14825		IDAE		Dies tipus		Simulacions (**)	
		Valors propis		Fabricant							
		(només cal.)		(només cal.)		(només cal.)		(cal. + ACS)		(cal. + ACS)	
		SCOP [-]	η_s [%]	SCOP [-]	η_s [%]	SCOP [-]	η_s [%]	SCOP [-]	η_s [%]	SCOP [-]	η_s [%]
Radiadors (55 °C)	Average E1 (Puigcerdà)	3,31	130 A++	3,47	136 A++	1,9-2,3	74-87 D/B	2,32 (*)	90 B	2,1-2,8	81-109 C/A+
	Warmer B3 (Tarragona)	3,85	151 A+++	4,90	193 A+++	2,0-2,4	79-93 C/A	2,37 (*)	93 A	2,3-3,5	89-137 B/A++
Terra radiant (35 °C)	Average E1 (Puigcerdà)	4,36	171 A++	4,75	187 A+++	3,2-3,8	125-147 A+	3,96	155 A++	3,0-4,3	117-169 A/A++
	Warmer B3 (Tarragona)	5,20	205 A+++	6,05	240 A+++	3,4-4,0	133-157 A+/A++	4,10	161 A++	3,0-4,0	117-157 A/A++

(*) Corba de calefacció entre 50 °C i 60 °C.

(**) Simulacions anuals. Rang de resultats amb corba de calefacció a temperatura constant i a temperatura variable.

Les conclusions més rellevants de l'estudi són les següents:

- L'aspecte que més influeix en el rendiment de les bombes de calor és la temperatura de treball (vinculada als sistemes emissors) i la seva regulació.
 - Com més baixa és la temperatura de consigna de sortida de la bomba de calor, millor és el seu rendiment.
 - El rendiment es degrada de forma significativa si la temperatura de consigna es manté constant i independent de les condicions ambientals exteriors.
 - Els fabricants recomanen la variació de la temperatura de consigna en funció de la temperatura ambient, mitjançant les anomenades *corbes de calefacció* d'acord amb el tipus de sistema emissor: control per temperatura exterior.
 - El càlcul de l'SCOP segons la normativa EN 14825 permet considerar aquesta variació de la temperatura de consigna en funció de la temperatura ambient i la major part dels fabricants reporten aquests resultats, que donen els valors d'SCOP més alts.
- La metodologia simplificada de l'IDAE subestima el rendiment estacional de les bombes de calor, ja que té en compte una única temperatura de treball en la impulsió.
- Els resultats obtinguts de manera experimental mitjançant la tècnica dels dies tipus són comparables amb els obtinguts amb el model de simulació anual.
- La diferència entre treballar a temperatura de consigna constant i temperatura de consigna variable és superior al 35%, considerant valors mitjans per al clima de Catalunya.
 - El valor de l'SCOP varia de 3,0 (temperatura constant) a 4,1 (temperatura variable) si es treballa a temperatura baixa (per exemple, amb terra radiant).
 - El valor de l'SCOP varia de 2,2 (temperatura constant) a 3,3 (temperatura variable) si es treballa a temperatura mitjana (per exemple, amb radiadors a 55 °C).
- Els valors de rendiment que reporten els fabricants en aplicar la norma EN 14825 o els valors obtinguts de l'aplicació d'aquesta mateixa metodologia amb punts de test en condicions estàtiques són superiors als valor obtinguts mitjançant experimentació i/o simulació anual. Les raons d'aquestes diferències són que els experiments i les simulacions anuals consideren:
 - El consum d'ACS en el sistema combinat.
 - La interacció dinàmica amb l'edifici i el sistema emissor en condicions de treball dinàmiques i semblants a la realitat.
 - La dinàmica de regulació de la mateixa bomba de calor, inclosa l'activació de les resistències elèctriques de suport.

A més, els tests de la norma estableixen condicions de treball ideals, sobretot a càrregues parcials molt baixes, que els equips en operació no reproduïxen.

- En relació amb l'anàlisi econòmica, un sistema de bomba de calor pot tenir un cost total d'usuari (CTU) equivalent, o més barat, al d'una caldera de gas a la majoria dels climes. Es destaquen els punts següents:
 - La bomba de calor té un cost d'adquisició bastant més alt que el d'una caldera.

- Pel que fa a l'operació, una bomba de calor és un sistema més barat que una caldera, considerant els costos anuals de l'energia usada, per la seva alta eficiència.
- Quan s'utilitza una regulació amb corba de calefacció, i especialment amb un terra radiant com a emissor, una bomba de calor és, gairebé en totes les zones climàtiques de Catalunya, més competitiva.
- Per subministrar la part renovable de la calefacció segons el CTE (obra nova o rehabilitacions integrals), un sistema de bomba de calor surt més barat que una caldera acompanyada d'un sistema solar tèrmic.
- A mesura que augmenti el percentatge d'energies renovables en el mercat elèctric, disminuirà el cost de l'electricitat, per la qual cosa es reduirà el CTU en el cas de les bombes de calor aerotèrmiques.

Per tant, i analitzant els aspectes comentats, per ordre d'importància, caldria:

- Recomana seguir les indicacions dels fabricants en relació amb el fet de treballar amb corbes de calefacció amb temperatura de consigna variable en funció de la temperatura ambient exterior.
- Recomana, en la mesura que sigui viable, treballar amb sistemes emissors a la temperatura més baixa possible.

10. Bibliografía

- [1] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. *UNE-EN 14825:2018: Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de locales: Ensayos y clasificación en condiciones de carga parcial y cálculo del rendimiento*. Madrid: AENOR, 2018.
- [2] INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. *Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para producción de calor en edificios*. IDAE, 2007.
- [3] RIEDERER, P.; PARTENAY, V.; RAGUIDEAU, O. «Dynamic test method for the determination of the global seasonal performance factor of heat pumps used for heating, cooling and domestic hot water preparation». *11th International IBPSA Conference*, 2009.
- [4] MEHRFELD, P.; HUCHTEMANN, K.; MÜLLER, D. «Influences of hot water tank states and the order of test days to gain the annual efficiency of heat pump systems evaluated using modelica». *Proc. 15th IBPSA Conf. San Fr. CA, USA, Aug. 7-9, 2017*, vol. 14511, núm. 2013 (2017), p. 1499-1504.
- [5] MENEGON, D; SOPPELSA, A.; FEDRIZZI, R. «Development of a new dynamic test procedure for the laboratory characterization of a whole heating and cooling system». *Appl. Energy*, vol. 205 (agost 2017), p. 976-990.
- [6] PÉAN, T. «Heat pump controls to exploit the energy flexibility of building thermal loads». Universitat Politècnica de Catalunya, 2020.
- [7] MINISTERIO DE VIVIENDA. *CTE - Código Técnico de la Edificación*. Madrid: 2006.
- [8] INSTITUT CATALÀ D'ENERGIA. *Els graus-dia de calefacció i refrigeració de Catalunya: Resultats a nivell municipal*. Generalitat de Catalunya. Institut Català d'Energia, 2003. (Estudis monogràfics; 14).
- [9] INSTITUT DE RECERCA EN ENERGIA DE CATALUNYA. *SELDIT - Eina de selecció de dies tipus*. Barcelona: IREC, 2018.
- [10] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN. *ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. UNE, 2006.
- [11] ORTIZ, J. *Detailed energy and comfort simulation of integral refurbishment of existing buildings in Catalonia*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.
- [12] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. *UNE EN 442:2015: Radiadores y convectores. Parte 1: Especificaciones y requisitos técnicos*. Madrid: AENOR, 2015.
- [13] ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. *UNE-EN 1264-1:2012: Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies*. Madrid: AENOR, 2012.
- [14] DIRECCIÓ GENERAL D'ENERGIA, SEGURETAT INDUSTRIAL I SEGURETAT MINERA. *Nota aclaradora RITE 1/2018: Consideracions a tenir en compte en la substitució de l'aportació solar mínima per a la producció d'ACS mitjançant bomba de calor aerotèrmica*. Generalitat de Catalunya, 2018.
- [15] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *EN 16147:2017: Heat pumps with electrically driven compressors - Testing and requirements for marking of domestic hot water units*. Brussel·les: CEN, 2017.
- [16] MINISTERIO DE VIVIENDA. *Documento básico CTE HE: Ahorro de energía*. Madrid: Ministerio de Vivienda, 2017.
- [17] EUROPEAN HEAT PUMP ASSOCIATION. *EHPA stats 2019* [en línia]. <<http://stats.ehpa.org>> [Consulta: 18 agost 2019].

Annex 1: Taula completa de càlcul del CTU

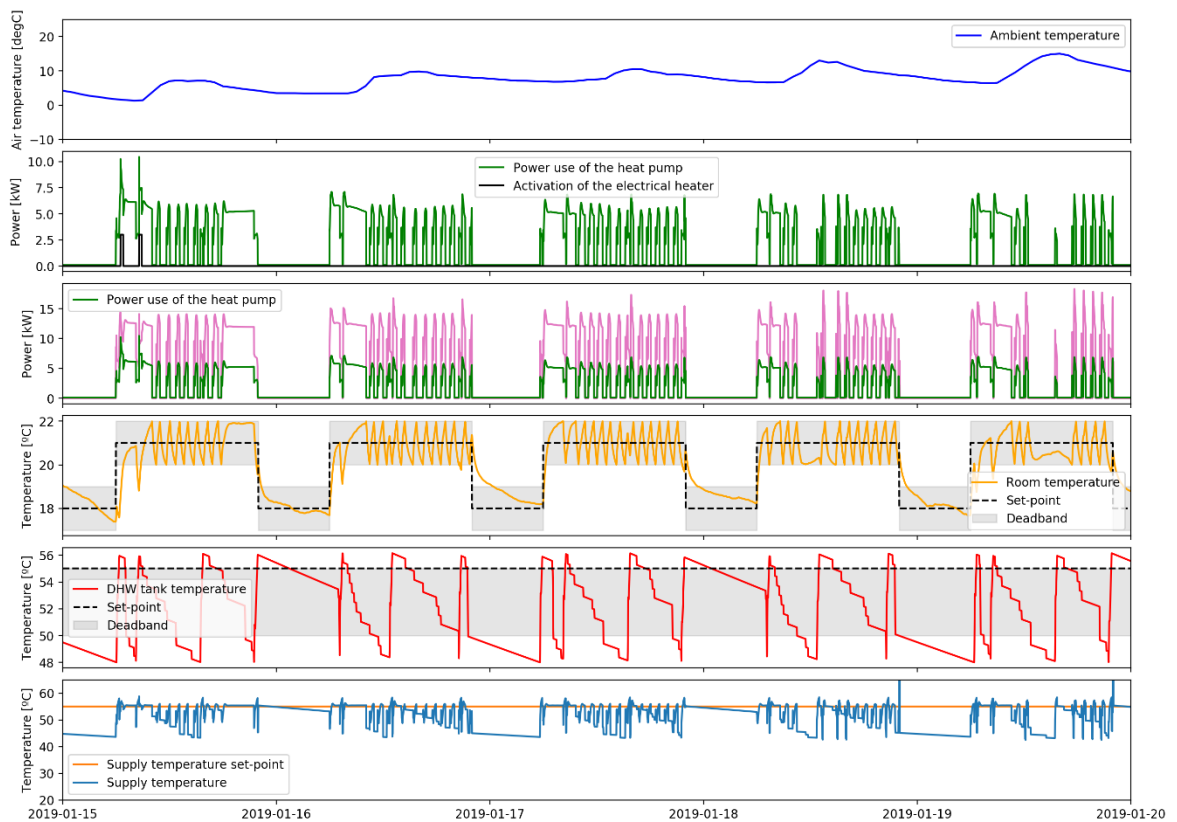
Clima	Sistema	Emissor	Cost adquisició	Cost energia anual	Manteniment	CTU
			€/any	€/any	€/any	€/any
B3	Bomba de calor	RD_CST	377,1	637,7	150	1.164,8
		RD_CC	377,1	467,0	150	994,1
		RBT_CST	377,1	565,1	150	1.092,2
		RBT_CC	377,1	484,6	150	1.011,7
		TR_CST	377,1	439,8	150	966,9
		TR_CC	377,1	347,4	150	874,5
	Caldera	RD_CST	122,9	604,6	150	877,5
	Caldera + solar	RD_CST	322,9	504,6	250	1.077,5
C2	Bomba de calor	RD_CST	377,1	774,9	150	1.302,0
		RD_CC	377,1	530,9	150	1.057,9
		RBT_CST	377,1	675,2	150	1.202,2
		RBT_CC	377,1	556,7	150	1.083,8
		TR_CST	377,1	524,0	150	1.051,0
		TR_CC	377,1	398,7	150	925,8
	Caldera	RD_CST	122,9	763,3	150	1.036,2
	Caldera + solar	RD_CST	322,9	663,8	250	1.236,7
D2	Bomba de calor	RD_CST	377,1	791,8	150	1.318,9
		RD_CC	377,1	588,6	150	1.115,6
		RBT_CST	377,1	692,9	150	1.220,0
		RBT_CC	377,1	597,1	150	1.124,2
		TR_CST	377,1	545,3	150	1.072,4
		TR_CC	377,1	412,1	150	939,2
	Caldera	RD_CST	122,9	741,3	150	1.014,2
	Caldera + solar	RD_CST	322,9	640,5	250	1.213,5
D3	Bomba de calor	RD_CST	377,1	733,9	150	1.260,9
		RD_CC	377,1	520,4	150	1.047,5
		RBT_CST	377,1	643,4	150	1.170,4
		RBT_CC	377,1	540,2	150	1.067,3
		TR_CST	377,1	506,9	150	1.034,0
		TR_CC	377,1	387,5	150	914,6

	Caldera	RD_CST	122,9	707,6	150	980,5
	Caldera + solar	RD_CST	322,9	607,8	250	1.180,7
E1	Bomba de calor	RD_CST	377,1	1.795,7	150	2.322,8
		RD_CC	377,1	1.340,3	150	1.867,4
		RBT_CST	377,1	1.513,0	150	2.040,1
		RBT_CC	377,1	1.309,4	150	1.836,4
		TR_CST	377,1	1.154,0	150	1.681,1
		TR_CC	377,1	783,0	150	1.310,1
	Caldera	RD_CST	122,9	1.669,8	150	1.942,7
	Caldera + solar	RD_CST	322,9	1.568,1	250	2.141,0
D1	Bomba de calor	RD_CST	377,1	919,4	150	1.446,4
		RD_CC	377,1	669,2	150	1.196,3
		RBT_CST	377,1	796,4	150	1.323,5
		RBT_CC	377,1	674,7	150	1.201,8
		TR_CST	377,1	616,6	150	1.143,7
		TR_CC	377,1	454,5	150	981,5
	Caldera	RD_CST	122,9	876,2	150	1.149,1
	Caldera + solar	RD_CST	322,9	775,4	250	1.348,4
C3	Bomba de calor	RD_CST	377,1	637,7	150	1.164,8
		RD_CC	377,1	467,0	150	994,1
		RBT_CST	377,1	565,1	150	1.092,2
		RBT_CC	377,1	484,6	150	1.011,7
		TR_CST	377,1	439,8	150	966,9
		TR_CC	377,1	347,4	150	874,5
	Caldera	RD_CST	122,9	604,6	150	877,5
	Caldera + solar	RD_CST	322,9	504,6	250	1.077,5

Annex 2: Comparació en els climes C2 i E1 d'una renovació d'una caldera per una bomba de calor sense modificar la instal·lació existent (radiadors)

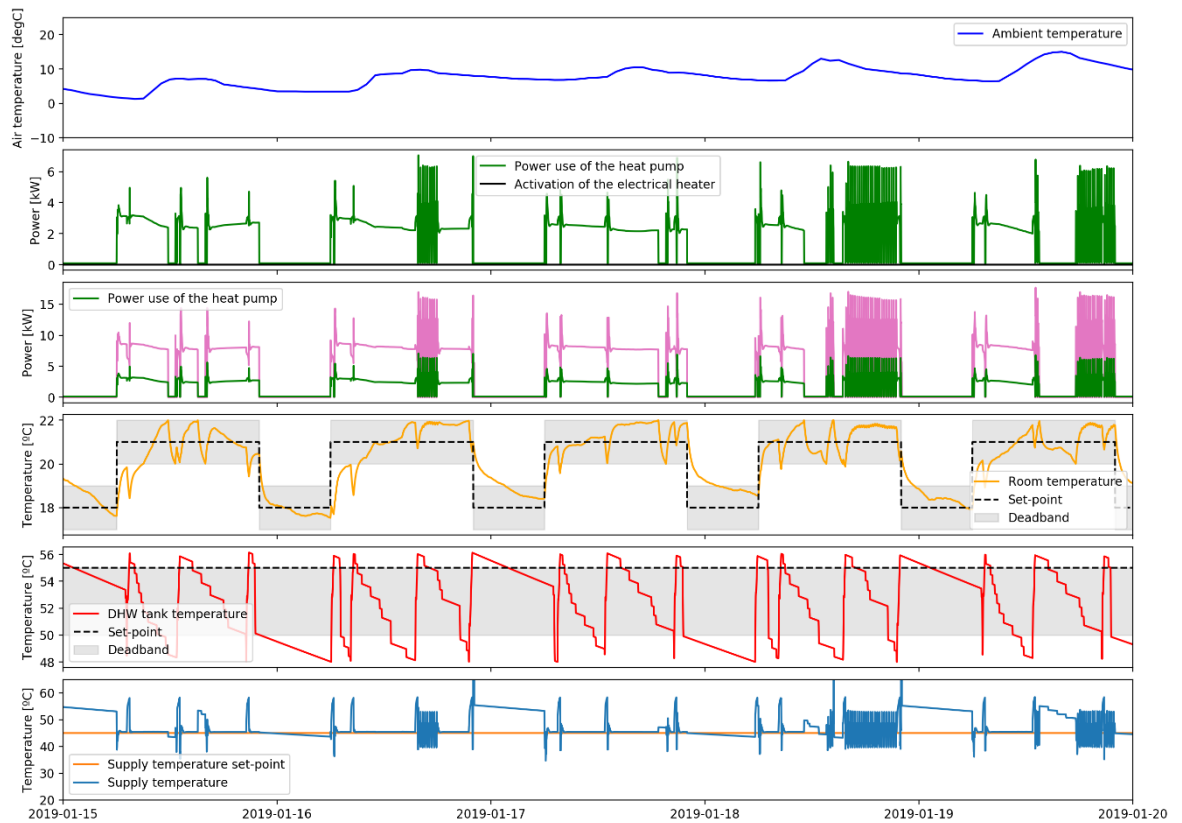
En aquest annex es detallen els resultats de la comparació per als climes C2 i E1 entre radiadors a temperatura d'impulsió constant a 55 °C o bé a 45 °C. La diferència respecte de la simulació que hi ha en l'informe és que en aquest cas, en la impulsió constant a 45 °C, els radiadors no s'han sobredimensionat per compensar la baixa temperatura d'impulsió. Per tant, els resultats d'aquest apartat es podrien assimilar a un habitatge en què hi hagi radiadors d'alumini com a emissors finals i es fes una renovació d'una caldera de condensació per una bomba de calor aerotèrmica sense fer cap modificació a la instal·lació existent (radiadors).

Cas 1 (original): clima C2 T = 55 °C



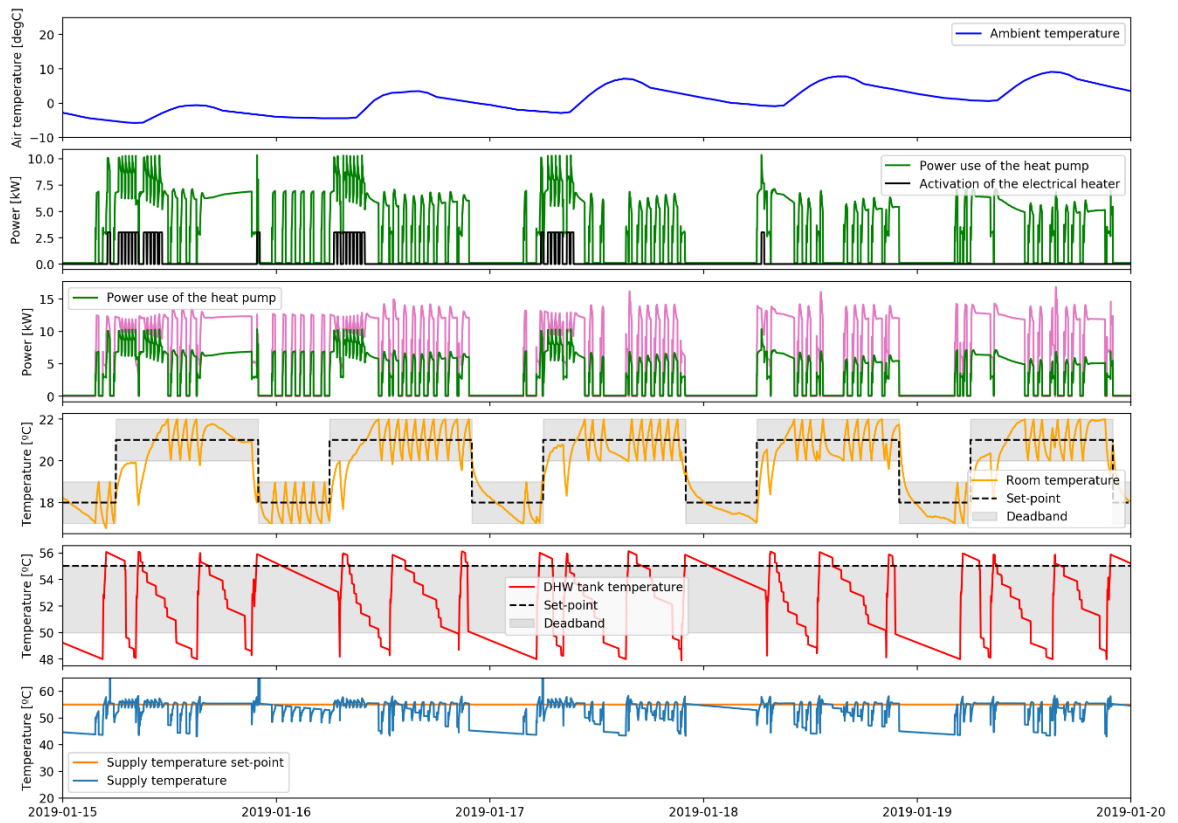
En aquesta imatge de resultats de la simulació energètica es pot observar que, en la quarta fila (temperatura, en color groc), hi ha força cicles d'arrancada i aturada al llarg del dia.

Cas 2: clima C2 T = 45 °C



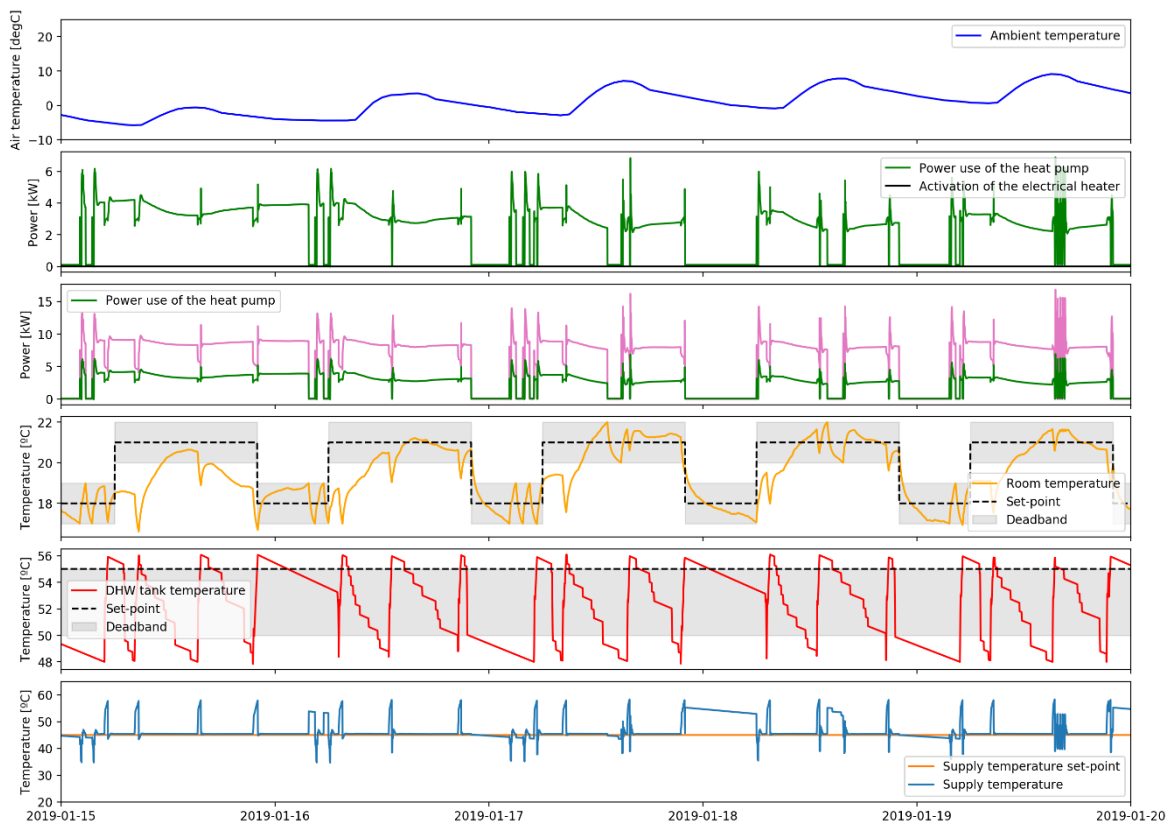
En aquesta segona imatge de resultats de la simulació energètica es pot observar que, en la quarta fila (temperatura, color groc), hi ha un comportament modulant continu. És a dir, en les primeres hores del matí hi haurà desconfort degut a l'aturada del sistema de calefacció durant la nit. En altres paraules, el sistema tarda a arribar a la temperatura de consigna i, per tant, hi ha unes hores de desconfort al matí, particularment els dies tipus en què les condicions exteriors són més extremes (primer i segon).

Cas 3 (original): clima E1 T = 55 °C



En aquesta imatge de resultats de la simulació energètica, es pot observar que, en la quarta fila (temperatura, en color groc), hi ha força cicles d'arrancada i aturada al llarg del dia. Hi ha un comportament similar al del cas 1.

Cas 4 (original): clima E1 T = 45 °C



En aquesta segona imatge de resultats de la simulació energètica es pot observar que, en la quarta fila (temperatura, color groc), hi ha un comportament modulant continu encara més accentuat que en el cas 2. És a dir, durant el matí hi haurà una sensació de desconfort significativa, degut a l'aturada del sistema de calefacció durant la nit, particularment els dies més extrems. Malgrat aquest comportament del sistema de calefacció, a la fila 6 es pot comprovar que la bomba de calor no té problemes tècnics per assolir la temperatura de 45 °C sense l'ajut de la resistència elèctrica de la bomba de calor.

Comparació del rendiment energètic

CLIMA C2	Energia tèrmica	Energia elèctrica	SCOP calefacció
Radiadors 55 °C	9.818	4.142	2,37
Radiadors 45 °C	9.999	3.383	2,96
Variació	+2%	-18%	+25%

CLIMA E1	Energia tèrmica	Energia elèctrica	SCOP calefacció
Radiadors 55 °C	23.342	1.1021	2,12
Radiadors 45 °C	23.506	8.372	2,81
Variació	+1%	-24%	+33%

- El reforç elèctric (*backup*) no entra en funcionament, ja que la bomba de calor pot subministrar sense problemes els 45 °C requerits.

- El canvi d'una caldera per una bomba de calor sense modificació de la resta de la instal·lació (radiadors) genera unes hores de desconfort.
- El rendiment de la instal·lació augmenta significativament, ja que no hi ha ús del reforç elèctric (*backup*) i la bomba de calor funciona a una temperatura d'impulsió més baixa.

Comparació del desconfort

CLIMA C2	Períodes per sota de la <i>deadband</i> baixa de confort		Períodes amb consigna alta SP = 21 °C
	Graus hora [°C.h]	Nre. d'hores [h]	Temperatura mitjana [°C]
Radiadors 55 °C	39,9	70,2	20,75
Radiadors 45 °C	70,2	124,6	20,84
Variació	+30,3	+54,4	+0,09

CLIMA E1 Radiadors 55 °C	Períodes per sota de la <i>deadband</i> baixa de confort		Períodes amb consigna alta SP = 21 °C
	Graus hora [°C.h]	Nre. d'hores [h]	Temperatura mitjana [°C]
Radiadors 55 °C	198,8	263,2	20,74
Radiadors 45 °C	565,9	656,7	20,62
Variació	+367,1	+393,5	-0,12

Nombre total d'hores del període de calefacció: 5.496 hores.

[#transicioenergetica](#)