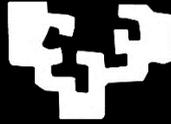


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Ensayo, modelado y análisis a escala de edificio de una Fachada Ventilada Forzada Fotovoltaica (FVFF) integrable en edificios de consumo casi nulo



Carlos García Gáfaró

Directores:

Dr. César Escudero Revilla

Dr. Iván Flores Abascal

Junio
2022



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

TESIS DOCTORAL

Ensayo, modelado y análisis a escala de edificio de una Fachada Ventilada Forzada Fotovoltaica (FVFF) integrable en edificios de consumo casi nulo

Presentada por:

Carlos García Gáfaró

Para aspirar al grado de:

Doctor Ingeniero Industrial

Directores de Tesis: Dr. César Escudero Revilla

Dr. Iván Flores Abascal

Bilbao, mayo de 2022

Resumen

El estado del bienestar al que tienden todos los países implica unos niveles de demanda energética a escala planetaria cuyo suministro en el escenario actual supone un importante coste medioambiental. Este suministro debe desplazarse con urgencia a un modelo de desarrollo sostenible. Adicionalmente, en casos como el de la Unión Europea (UE) existe una fuerte dependencia del suministro energético procedente de fuera de la Unión, lo que le plantea un verdadero desafío energético-económico.

Ante este reto, la UE ha fomentado tanto el aumento de la eficiencia energética para reducir sensiblemente los niveles de demanda, como el aumento del aporte de las energías procedentes de fuentes renovables. En este contexto, la UE establece unos claros objetivos para los años 2030 y 2050 en los sectores clave del problema energético, siendo el sector de la edificación uno de los más relevantes. Estos objetivos abren un periodo de transición energética, que para el caso del ámbito de la climatización tendrá a la Bomba de Calor (BdC) como una tecnología protagonista. Esta es capaz de aprovechar la energía térmica de fuentes catalogadas como renovables: aerotermia, geotermia e hidrotermia. Además, participa en el proceso de “descarbonización del sector” y puede combinarse con otras tecnologías generando sistemas de mayores rendimientos.

En este sentido, la integración de la BdC con otras tecnologías para mejorar la eficiencia energética es el punto de partida de esta Tesis, cuyo objetivo principal es determinar el potencial que tiene una fachada ventilada forzada fotovoltaica (FVFF) como tecnología de apoyo a la bomba de calor. En la literatura los casos de aplicación de fachadas ventiladas como colectores solares térmicos se enfocan al uso del aire precalentado como aire de ventilación o de apoyo al mismo. Así mismo, la combinación de BdC con sistemas de apoyo energético solar se suele hacer con dispositivos solares térmicos o fotovoltaicos al uso.

La solución FVFF emplea en su hoja exterior una tecnología de reciente y constante desarrollo basada en vidrios fotovoltaicos opacos. La cámara de aire es conectada al evaporador de la BdC con sistemas de conductos tradicionalmente empleados en los sistemas de ventilación. Por tanto se trata de una propuesta basada en tecnología existente y ya comercializada, lo que la hace tecnológicamente viable. Otra cualidad importante es el uso de flujo forzado en la cámara de aire, operando a dos niveles de caudal. Un caudal bajo de 10 l/s en condiciones de tiempo nublado o en horario nocturno, y un caudal alto de 200 l/s cuando la temperatura superficial exterior de la fachada es 5 °C superior a la temperatura ambiente. Esta última configuración se denomina “de ganancia térmica”.

El documento de la Tesis se estructura en tres cuerpos principales. El primero describe la caracterización experimental llevada a cabo en condiciones reales exteriores de una solución de FVFF, empleando el método basado en la célula de ensayo PASLINK. En esta fase, y previo a la caracterización de la FVFF, se ha realizado un proceso de puesta a punto de la célula como continuación del trabajo realizado por el Dr. Escudero. La célula PASLINK funciona esencialmente como un calorímetro y se ha desarrollado una metodología de tratamiento dinámico de los efectos de borde para reducir el error que estos tienen sobre la medida global.

En la segunda parte, con base en el modelo de parámetros concentrados que genera el método de ensayo PASLINK, se desarrolla un modelo numérico RC que permite predecir el calentamiento del flujo de aire forzado a través de esta fachada para cualquier localidad, en función de la radiación incidente y de la temperatura exterior

Finalmente, en la última parte del trabajo, un análisis a escala de edificio mediante simulación energética con EnergyPlus, plantea una posible estrategia al reto de integrar en el edificio el aprovechamiento solar térmico predicho por el modelo de FVFF. Es una estrategia que se ha denominado “Temperatura adaptativa” que emplea al propio edificio como un sistema de acumulación de la energía aprovechada. Consiste en incrementar la temperatura de consigna interior en los instantes “de ganancia térmica” de la FVFF, los cuales suelen coincidir con instantes de baja ocupación y/o demanda.

Tomando como ejemplo un edificio residencial con suelo radiante del tipo de consumo casi nulo en la ciudad de Madrid (España), se obtuvo que al implementar la hibridación FVFF y BdC se reduce en un 19,9% el consumo de calefacción con respecto al mismo edificio sin FVFF. Al contabilizar, además, el apoyo de esta FVFF a la bomba de calor para ACS y la generación fotovoltaica de su hoja exterior, se obtiene que hay una reducción de un 20,7% en el total anual de energía final necesaria para suplir la demanda de calor de dicho edificio.

Laburpena

Energia eskari handiak eragiten ditu mundo mailako lurralde guztiek helburutzat duten ongizate-estatuak. Eta energia horren horniduraren ondorio da ingurumen- kostu izugarria. Hornidura hori berehala eraldatu beharra dago garapen iraunkorreko eredu batera. Horrez gain, hainbat lekutan Europar Batasunean (EB) kasu, kanpoko energia-hornidurarekiko mendekotasun handia dago, eta horrek benetako energia-desafio ekonomikoa dakar.

Erronka horren aurrean, EBk energia-eraginkortasunaren hazkundera sustatu du, eskari-mailak nabarmen murrizteko, bai eta iturri berriztagarrietatik datozen energien ekarpena handitzeko ere. Testuinguru horretan, EBk helburu argiak ezarri ditu energia- arazoaren giltzarrietan, 2030 eta 2050etarako, eta eraikuntzaren sektorea da giltzarri garrantzitsuenetakoa bat. Helburu horiek energia-trantsizioaldi bat irekitzen dute, eta, klimatizazioaren arloan, bero-ponpa izango da teknologia protagonista. Teknologia hori gai da energia berriztagarritzat katalogatutako iturrietatik (aeroterminia, geoterminia eta hidrotérminia) energia termikoa aprobetxatzeko. Gainera, “sektorea deskarbonizatzeko” prozesuan parte hartzen du, eta beste teknologia batzuekin konbina daiteke errendimendu handiagoko sistemak lortuz.

Alde horretatik, bero- ponpak (BdC) beste teknologia batzuekin integratuta energia-eraginkortasuna hobetzea da tesiaren abiapuntua. Tesiaren helburu nagusia da fatxada aireztatu fotovoltaiko (FVFF) batek bero-ponpari laguntzeko duen potentziala zehaztea. Literaturan, fatxada aireztatuak eguzki-kolektore termiko gisa erabiltzen direnean, alde aurretik berotutako airea erabiltzen da aireberritze- edo aireztapena laguntzeko. Halaber, bero-ponpa (BdC) eta eguzki energian oinarritutako sistemen arteko konbinazioa eguzki-gailu termiko edo fotovoltaikoekin egiten da.

FVFF soluzioak kanpoko orrian beira fotovoltaiko opakoetan oinarritutako teknologia berri eta garapen etengabe dagoena erabiltzen du. Aire-ganbera bero-ponparen lurrungailura konektatzen da, aireztapen-sistemetan erabili ohi diren hodi-sistemekin. Beraz, lehendik dagoen eta merkaturatuta dagoen teknologian oinarritutako proposamena da, eta, beraz, teknologikoki bideragarria da. Beste ezaugarri garrantzitsu bat aire-ganberan fluxu behartua erabiltzea da, bi emari-mailatan lan eginez: 10 l/s-ko emari txikia, lainotuta dagoenean edo gauez, eta 200 l/s-ko emari handia, fatxadaren kanpoko azaleko tenperatura giro-tenperatura baino 5 °C handiagoa denean. Azken konfigurazio horri irabazi termikoko konfigurazioa deritzo..

Tesiaren dokumentuak hiru atal nagusi ditu. Lehenak FVFF soluzio baten kanpoko baldintza errealetan egindako karakterizazio esperimentalak deskribatzen du, PASLINK entsegu- zelulan oinarritutako metodoa erabiliz. Fase honetan, FVFF soluzioa karakterizatu aurretik, zelula prest jartzeko prozesu bat egin da, Escudero doktoreak egindako lanaren jarraipen gisa. PASLINK zelulak, funtsean, kalorimetro gisa funtzionatzen du, eta ertz-efektuen tratamendu dinamikorako metodologia garatu da, osotasuneko neurketetan duten errorea murrizteko.

Bigarren zatian, PASLINK entsegu-metodoak sortzen dituen parametro kontzentratuen eredu oinarrituta, RC modelo matematiko bat garatzen da, fatxada horretan zehar ematen den aire-fluxuaren beroketa edozein herritan aurreikusitako aukera ematen duena, erradiazio intzidentearen eta kanpoko tenperaturaren arabera

Azkenik, lanaren azken zatian, eraikinaren eskalan Energy Plus-ekin simulazio energetikoa gauzatu da eta egindako azterketa horrek estrategia posible bat planteatzen du: eraikinean FVFF soluzioen bidez aurreikusitako eguzki-aprobetxamendu termikoa eraikinean integratzeko erronka. “Egokitze-tenperatura” izeneko estrategia da, eta eraikina bera erabiltzen du aprobetxatutako energia metatzeko sistema gisa. Barne-kontsignako tenperatura FVFFren “irabazi termikoko” uneetan igotzean datza. Une horiek bat etorri ohi dira okupazio eta/edo eskaera txikiko aldiekin.

Adibide baterako, FVFF eta bero- ponpaz (BdC) osatutako sistemak %19,9 murrizten dezake berokuntza-kontsumoa Madrilen (Espainia) kokatzen den eta zoru erradiatzailea eta energia- kontsumo ia nulua duen bizitegi- eraikin batean. Gainera, FVFF horrek ur bero sanitarioa (UBS) produzitzeko bero-ponpari ematen dion laguntza eta fatxadako kanpoko orriaren sorkuntza fotovoltaikoa kontabilizatzean, %20,7ko da aurrezpena urteko bero- eskaria asetzeko beharrezko azken energiaren kontsumoan.

Abstract

The state of well-being to which all countries aspire implies a huge energy demand. Supplying this demand comes at a significant cost to the environment and must be adapted to a more sustainable model. Another problem is that many organisms, for instance the European Union (EU), depend on energy sources located outside of their borders. This poses a difficult challenge to balance economical and energetical concerns.

To meet this challenge, the European Union has promoted not only energy efficiency to drastically reduce demand, but also the utilization of renewable energy sources. The European Union has established clear objectives for the years 2030 and 2050 in the key sectors pertaining to the energy problem, the building sector being one of the most important. Thus, a new period of energetical transition has begun, and within the field of climatization the Heat Pump (HP) has emerged as a leading technology, capable of using heat energy from sources categorized as renewable: aerothermal, geothermal and hydrothermal. Furthermore, the HP contributes to the 'Decarbonization of the sector' and can be used in concert with other technologies, yielding more performance.

This thesis started with a focus on integrating the BdC with other technology to improve energetical efficiency and with the objective of determining the potential of one particular photovoltaic forced ventilated façade (PV-FVF) used as support for a heating and DHW system based on air source heat pump (ASHP). The literature shows that the most common and most studied application to date is to integrate the facades as solar thermal collectors. These are focused on the use of preheated air as ventilation air or supporting it. Likewise, the combination of ASHP with solar energy support systems is done with common commercial solar thermal or photovoltaic devices.

The FVFF solution uses a recent and constantly developing technology based on opaque photovoltaic glass on its outer leaf. The air chamber is connected to the ASHP evaporator with duct systems traditionally used in ventilation systems. It is a proposal based on existing and already commercialized technology and thus is quite feasible. Another important quality is the use of forced flow operating at two flow levels in the air chamber. A low flow rate of 10 l/s in cloudy weather conditions or at night, and a high flow rate of 200 l/s when the external surface temperature of the facade is 5 °C higher than the ambient temperature. The latter configuration is called "net heat gain"

The thesis is structured in three main parts. The first describes the experimental characterization carried out under real outdoor conditions of a PV-FVF solution, using the PASLINK test cell method. In this phase, and prior to the characterization of the FVFF, a process of tuning the cell has been carried out as a continuation of the work done by Dr. Escudero. The PASLINK cell works essentially as a calorimeter and a methodology of dynamic treatment of the edge effects has been developed in order to obtain a more accurate measurement.

In the second part, based on the concentrated parameter model generated by the PASLINK test method, a numerical RC model is developed to predict the heating of the forced air flow through this façade for any location, as a function of incident radiation and outside temperature

The final part of the investigation, a building-scale analysis through energy simulation with EnergyPlus, proposes a strategy to integrate the solar thermal gain predicted by the FVFF model into the building. This strategy is called "Adaptive Temperature" which uses the building itself as an accumulation system for the harnessed energy. It consists of increasing the interior set point temperature in the "net heat gain" moments of the FVFF, which usually coincide with moments of low occupancy and/or low demand.

A nZEB type residential building in Madrid Spain, equipped with underfloor heating is used as a case study. From this, it was found that the heating consumption is reduced by 19.9% by implementing the hybridization of PV-FVF and ASHP, compared to the same building without PV-FVF. Furthermore, when taking into account the support of PV-FVF to the DHW and the photovoltaic generation on its outer leaf, the total annual final energy required to meet the heat demand of the building is reduced by 20.7%.



Ensayo, modelado y análisis a escala de edificio de una Fachada Ventilada Forzada Fotovoltaica (FVFF) integrable en edificios de consumo casi nulo

ENEDI Research Group
Energetical Engineering Dep.
Carlos García-Gáfaró



INDICE

RESUMEN	4
INDICE	8
NOMENCLATURA	12
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABLAS	20
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	21
1.1. INTRODUCCIÓN	22
1.1.1. Contexto actual	22
1.1.2. Acoplamiento de fuentes de calor a una BdC para mejorar su rendimiento	24
1.1.3. Bombas de Calor aerotérmicas asistidas por energía solar (BdCAS)	27
1.1.4. Uso de la envolvente como elemento solar activo y su integración con las instalaciones energéticas del edificio	30
1.1.5. Modelado de fachadas ventiladas solar activas	32
1.1.6. Uso de la estructura del edificio como dispositivo acumulador térmico: BaB “building as battery”	33
1.1.7. Investigación propuesta y metodología	34
1.2. OBJETIVOS	36
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS	37
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN TÉRMICA EXPERIMENTAL	38
2.1. INTRODUCCIÓN	39
2.2. MEJORA DE LA PRECISIÓN DE DETERMINACIÓN DEL FLUJO DE CALOR EN LA CÉLULA PASLINK	40
2.2.1. Determinación del factor del efecto de borde a partir de un ensayo de calibración PASLINK	43
2.2.1.1. Tipos de efecto de borde en una célula PASLINK	43
2.2.1.2. Tratamiento de los efectos de borde en un ensayo PASLINK	44
2.2.1.3. Procedimiento del ensayo de Calibración PASLINK	48
2.2.2. Método propuesto para la determinación del factor de efecto de borde	54
2.2.2.1. Hipótesis	54
2.2.2.2. Validación del método propuesto. Ejemplo para el borde de tipo T1	55
2.2.3. Resultados de aplicación del método a la célula EGUZKI	59
2.2.3.1. Factor total $F_{c,t}$ usando el procedimiento PASLINK original	59

2.2.3.2.	Factor total $F_{c,t}$ usando factores dinámicos para la corrección de los efectos de bordes.....	59
2.3.	CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA SOLUCIÓN FVFF.....	63
2.3.1.	Configuración del experimento y de la muestra	63
2.3.2.	Ejecución de los ensayos y resultados experimentales.....	66
2.3.2.1.	Periodos de ensayo y secuencias de excitación térmica empleadas.....	66
2.3.2.2.	Control del caudal de extracción.....	66
2.3.2.3.	Radiación solar en los dos periodos de ensayo	67
2.3.2.4.	Temperaturas medias durante los periodos de ensayo	69
2.3.2.5.	Temperaturas y ganancia térmica en la cámara ventilada.....	70
2.3.2.6.	Caudal y velocidades de aire en cámara.....	77
2.3.2.7.	Generación eléctrica fotovoltaica	79
2.4.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	82
CAPÍTULO 3. MODELO PARA DETERMINAR LA TEMPERATURA EN LA CÁMARA DE LA FVFF.....		85
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	86
3.2.	SELECCIÓN DEL TIPO DE MODELO.....	87
3.2.1.	Clases de modelos	87
3.2.2.	Técnica seleccionada	89
3.3.	PROCESO DE OBTENCIÓN DEL MODELO.....	89
3.3.1.	Herramientas PASLINK para la identificación de parámetros.....	90
3.3.2.	Modelo RC.....	94
3.3.2.1.	Representación de la célula de ensayos.....	96
3.3.2.2.	Representación de la hoja de vidrios fotovoltaicos	97
3.3.2.3.	Representación del intercambio de calor en cámara	98
3.3.3.	Conversión a Modelo numérico	101
3.3.3.1.	Discretización del muro de bloque de hormigón.....	102
3.3.3.2.	Discretización de la capa de lana mineral.....	105
3.3.3.3.	Cámara de aire	106
3.3.3.4.	Hoja exterior de vidrios fotovoltaicos	110
3.3.3.5.	Planteamiento del modelo numérico.....	111
3.3.4.	Validación del modelo numérico.....	118
3.3.4.1.	Comprobación del modelo a partir de los datos de invierno	118
3.3.4.2.	Validación del modelo con datos experimentales de verano.....	121
3.4.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	123
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS A ESCALA DE EDIFICIO DE LA FVFF.....		124
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	125

4.2.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE EDIFICIO DE REFERENCIA.....	127
4.2.1.	Geometría y localización.....	127
4.2.1.1.	Composición de los cerramientos.....	129
4.2.2.	Uso del edificio.....	130
4.2.2.1.	Horarios de ocupación y demandas/cargas.....	130
4.2.2.2.	Demanda de ACS.....	131
4.2.3.	Instalaciones.....	132
4.2.3.1.	Instalación de calefacción mediante bomba de calor aire-agua y suelo radiante.....	133
4.2.3.2.	ACS mediante bomba de calor aire-agua.....	138
4.2.3.3.	Sistema de ventilación mecánica de doble flujo con recuperación de calor.....	144
4.2.3.4.	Temperatura de consigna interior – edificio de referencia.....	146
4.3.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE EDIFICIO CON FVFF	146
4.3.1.	Incorporación de elementos de FVFF en fachada sur.....	147
4.3.2.	Definición de la generación fotovoltaica de la FVFF.....	148
4.3.3.	Intercambio del aire extraído de la FVFF y los evaporadores de las bombas de calor.....	149
4.3.4.	Temperatura de consigna adaptativa definida para el modelo de edificio con FVFF.....	150
4.4.	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	151
4.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	152
4.5.1.	Efecto de la consigna tipo CTE en el edificio de Referencia.....	152
4.5.2.	Determinación de la ganancia térmica en cámara de FVFF.....	153
4.5.3.	Efecto de la consigna adaptativa en el edificio con FVFF.....	154
4.5.4.	Mejora en la eficiencia del sistema y reducción del consumo energético.....	155
4.5.5.	Discusión.....	158
4.6.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	159
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO.....		161
5.1.	CONCLUSIONES.....	162
5.2.	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	163
5.2.1.	Montaje y monitorización de una FVFF en un edificio.....	163
5.2.1.	Caracterización y modelado de otras configuraciones de FVFF.....	164
5.2.2.	Análisis de soluciones de fachada en general.....	165
5.2.3.	Estudios de sensibilidad para la aplicación de la hibridación FVFF+BdC.....	165
ANEXO A.	Publicación 1: Determinación dinámica de efectos de borde en célula PASLINK.....	166
ANEXO B.	Información complementaria al análisis a escala de edificio de la FVFF.....	168
B.1.	Anejos y tablas de los documentos básicos HE y HS.....	169

B.1.1.	Relativo a la ocupación y cargas internas (DB-HE).....	169
B.1.1.1.	Relativo a la ocupación y cargas internas (DB-HE).....	169
B.1.2.	Relativo a la ocupación mínima y a la demanda de referencia de ACS (DB-HE).....	170
B.1.3.	Relativo a la temperatura del agua de red (DB-HE).....	171
B.1.4.	Relativo a la ventilación (DB-HS).....	172
B.2.	Catálogos de especificaciones técnicas de las bombas de calor de calefacción y ACS.....	173
B.2.1.	Bomba de Calor AquaSnap 30 RQS.....	173
B.2.2.	Bomba de Calor AquaSnap 61 AF.....	178
B.3.	Propiedades y programaciones definidas en desigbuilder para las bombas de calor.....	185
B.3.1.	Definiciones para la Bomba de Calor de Calefacción.....	185
B.3.2.	Generación de las Curvas de Rendimiento Energyplus para Carrier 30RQS.....	188
B.3.3.	Definiciones para la Bomba de Calor para ACS.....	193
B.3.4.	Generación de las Curvas de Rendimiento Energyplus para Carrier 61AF.....	196
B.3.5.	Scripts para la programación del aire exterior en los evaporadores de las Bombas de Calor.....	200
B.4.	Reporte DesignBuilder de las simulaciones.....	203
B.4.1.	Reporte de la simulación del edificio de referencia.....	203
B.4.2.	Reporte de la simulación del edificio con FVFF.....	212
ANEXO C.	Publicación 2. Hibridación de FVFF con bomba de calor.....	221
REFERENCIAS.....		240

NOMENCLATURA

A_{fac}	Superficie total de la muestra PASLINK	[m ²]
A_{il}	En un modelo de parámetros concentrados, la apertura (fracción) de Q_l que entra al circuito a través del nodo i. Adimensional o con unidades de superficie, dependiendo de las unidades de Q_l	[adim.] or [m ²]
$A(i); A(j)$	Área recubierta por el grupo de HFS-Tiles, (i) o (j) respectivamente	[m ²]
A_{pv}	Superficie de la muestra PASLINK con vidrios fotovoltaicos.	[m ²]
α	Difusividad térmica	[m ² /s]
AT-LCCE	Área Térmica del Laboratorio de Control de la Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco	[acronym]
C_i	En un modelo de parámetros concentrados, capacitancia térmica del nodo i.	[J/m ² ·K]
CTE	Código Técnico de la Edificación	[acronym]
c_p	Calor específico	[J/kg·K]
c_{p_air}	Calor específico del aire.	[J/kg·K]
ΔT_{air}	Diferencia de temperatura del flujo de aire entre la entrada y la extracción a su paso por la cámara de la FVFF.	[°C]
ρ	Densidad	[kg/m ³]
ρ_{air}	Densidad del aire.	[kg/m ³]
ε	Emisividad	[adim.]
\in_{ref}	Factor de conversión de las HFS-Tiles	[$\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$]
F_c	Factor de efecto de borde, ratio entre el valor del flujo de calor real y el medido, en la zona de influencia del efecto de borde	[Adimensional]
$F_{c(T1)}, F_{c(T2)}, F_{c(T3)}$	Factor de efecto de borde para las tipologías de efecto 1, 2 y 3 respectivamente.	[Adimensional]
F_{c_t}	Factor total de calibración de la célula PASLINK	[Adimensional]
f_{summ}	Velocidad de aire en la cámara de la FVFF en condiciones de verano, ajustado por una función de ajuste sigmoide de Boltzmann	[m/s]
f_{wint}	Velocidad de aire en la cámara de la FVFF en condiciones de invierno, ajustado por una función de ajuste sigmoide de Boltzmann.	[m/s]
G1, G2... G21	Grupo de HFS-Tiles conectadas en serie, cubriendo un área específica	[Adimensional]
$gA\text{-value}$	Factor de ganancia solar de la muestra	[m ²]
G_h	Irradiancia global sobre una superficie horizontal	[W/m ²]
G_v	Irradiancia global sobre una superficie vertical sur	[W/m ²]
\dot{G}_v	Potencia de Irradiancia global sobre una superficie vertical sur	[W]
H_{ij}	En un modelo de parámetros concentrados, conductancia entre el nodo j y el nodo i. Expresado por área transversal al flujo de calor o no, dependiendo del modelo	[W/ K] or [W/m ² K]

λ	Conductividad térmica	[W/m·K]
n_{tr}	Renovación de aire del interior de la célula PASLINK	[h ⁻¹]
P_e	Potencia eléctrica calefactora entregada al interior de la sala de ensayos de la célula PASLINK	[W]
<i>FVFF</i>	Fachada Ventilada Fotovoltaica Forzada	[acronym]
Q	Flujo de calor	[W]
Q_{hfs_t}	Fujo de calor medido por todas las HFS-Tiles	[W]
$Q_{hfs_central}(j)$	Flujo de calor medido por el grupo (j) de las HFS-Tiles ubicadas en la zona central adyacente al grupo (i)	[W]
$Q_{hfs_edge}(i)$	Flujo de calor medido por el grupo (i) de las HFS-Tiles ubicadas en el borde	[W]
q	Flujo de calor por unidad de superficie	[W/m ²]
q_0	Flujo de calor por unidad de superficie en la esquina interior de la arista creada por el encuentro de dos paredes	[W/m ²]
q_A, q_B, q_C	Flujo de calor por unidad de superficie en los puntos de medida A, B, C de una Multi-Tile	[W/m ²]
\dot{Q}_{gain}	Ganancia de flujo de calor del caudal de aire que cruza una FVFF	[W]
\dot{q}_{gain}	Flujo de calor por unidad de superficie transferido al caudal de aire, a su paso por la cámara de una FVFF	[W/m ²]
Q_i	En un modelo de parámetros concentrados, flujo de calor que entra al circuito a través de alguno de sus nodos, expresado en unidades de potencia o de calor por unidad de superficie.	[W] or [W/m ²]
L	Longitud de la zona medida por Tiles o por Multi-Tiles en un borde	[m]
L^{2D}	Coefficiente de acoplamiento térmico obtenido de una simulación 2D, según EN ISO 10211:2012	[W/m·K]
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance	[adim.]
T_i, T_j, T_k	En un modelo de parámetros concentrados, temperatura del nodo i, j, k.	[K]
$T_{adaptive}$	Estrategia de control adaptativo de la temperatura de consigna interior	[°C]
T_{ext}	Temperatura de aire exterior en torno a la célula PASLINK	[°C]
T_{int}	Temperatura del aire interior en la sala de ensayos de la célula PASLINK	[°C]
τ	Número discreto de Fourier	[adim.]
Ψ	Factor de transferencia lineal en un efecto de borde	[W/m·K]

UA -value	Coefficiente de transmitancia térmica de una muestra PASLINK	[W/K]
\dot{v}	Flujo de aire que cruza la cámara ventilada.	[m ³ /s]

Lista de Figuras

Figura 1.1. –	Arreglo en paralelo o en serie de los componentes de una BdC.....	24
Figura 1.2. –	Esquema de una bomba de calor con un colector solar como evaporador [32].	25
Figura 1.3. –	Intercambiador de calor a tres flujos [33].....	25
Figura 1.4. –	Ejemplo de una instalación en intercambio indirecto: (a) con una fuente energética [34] y (b) con más de una fuente energética [35].	26
Figura 1.5. –	Carta de flujo energético y de fronteras de un sistema BdCAS (Task 53 [37]).	27
Figura 1.6. –	Apoyo solar térmico directo con colector solar en serie teniendo el evaporador antes que el colector (a)[40], y al contrario (b)[41], y con colectores en paralelo en (c)[42] y (d)[43].	28
Figura 1.7. –	Apoyo solar térmico indirecto con sistemas en paralelo (a), en serie (b) y regenerativo (c)[44]	29
Figura 1.8. –	Esquema de una cubierta inclinada con tejas fotovoltaicas, elevada para producir aire precalentado hacia el evaporador en cumbre [67].	30
Figura 1.9. –	Aspecto de un módulo del tipo (a) “unglazed transpired solar collector (UTC)” y (b) UTC con módulos fotovoltaicos, usados en la experimentación de [80].	31
Figura 1.10. –	Caso de estudio para los colectores UTC abasteciendo tanto ventilación como calefacción y electricidad, a pesar de su poca superficie en relación al edificio[79]. ...	31
Figura 1.11. –	Esquema del sistema dual propuesto por K. Martin[82].....	32
Figura 1.12. –	Representación esquemática de un evento BaB precediendo el periodo de ocupación [95].	34
Figura 1.13. –	Aspecto de los tres salones de las tres viviendas empleadas para el estudio de [95] ...	34
Figura 2.1. –	Estructura general de la célula de ensayos PASSYS [105].	40
Figura 2.2. –	Vista frontal de una HFS-Tile típica (izquierda). Vista posterior de la misma HFS-Tile (centro). Vista posterior de una Multi-Tile.	41
Figura 2.3. –	Sala de ensayos de la Célula EGUZKI en el LCCE de Vitoria-Gasteiz y representación de los grupos de HFS-Tiles indicando la posición de las Multi-Tiles. .	43
Figura 2.4. –	“Muro de Calibración” de la Célula Eguzki en el LCCE de Vitoria-Gasteiz y representación de los grupos de HFS-Tiles indicando la posición de sus dos Multi-Tiles.	44
Figura 2.5. –	Variación típica de densidad de flujo de calor transferido en la superficie interior por el efecto de borde, expresado como porcentaje respecto al flujo central unidimensional.	46
Figura 2.6. –	Sensores A (3 cm), B (12 cm), C (43 cm) de una Multi-Tile y perfil del flujo de calor en el borde.....	47
Figura 2.7. –	Aproximación lineal del flujo de borde en el encuentro entre cubierta y paredes, tipología de borde T1.	48
Figura 2.8. –	Medida del caudal de aire de infiltración antes y después del ensayo de calibración. .	49
Figura 2.9. –	Secuencia ROLBS (izquierda), y secuencia PRBS (derecha).....	50
Figura 2.10. –	Potencia eléctrica de calentamiento y correspondiente medida del flujo de las HFS Tiles para las rutinas PRBS, ROLBS y PULSO, de arriba abajo respectivamente.	51

Figura 2.11 –	Respuesta de las HFS tiles en un intervalo de alta frecuencia de excitación durante el periodo ROLBS.....	52
Figura 2.12 –	Indicación del periodo de tiempo que representa la excitación térmica de la secuencia PULSO.....	53
Figura 2.13 –	Campo de temperaturas en la sección del encuentro entre cubierta y pared lateral, y perfiles de la variación del flujo de calor en las superficies interiores.....	56
Figura 2.14 –	Temperatura interior y exterior grabada por la célula, aplicada al modelo numérico del efecto de borde de Tipo 1.....	56
Figura 2.15 –	Flujos unidimensionales obtenidos mediante el modelo numérico en la zona alejada del efecto de borde de Tipo 1. La figura inferior es una ampliación del intervalo sombreado.....	57
Figura 2.16 –	Variación del perfil del flujo de calor para el efecto de borde Tipo 1. Valores obtenidos para distintos momentos de la simulación del ensayo.....	57
Figura 2.17 –	Comparación de la señal de las HFS-Tiles con y sin corrección del efecto de borde, empleando factores dinámicos para las secuencias PULSO (superior) y ROLBS (inferior).....	58
Figura 2.18 –	Modelo de simulación del borde tipo T2 con sus correspondientes perfiles de flujo de calor superficial.....	60
Figura 2.19 –	Modelo de simulación del borde tipo T3 con sus correspondientes perfiles de flujo de calor superficial.....	61
Figura 2.20 –	Muestra ensayada y esquema de la sección de fachada FVFF.....	63
Figura 2.21 –	Dos etapas del proceso de fabricación de la muestra y aspecto del sistema de extracción de aire de cámara instalado sobre la célula de ensayo.....	64
Figura 2.22 –	a) Instrumentación dispuesta en sección de muestra, a cuatro alturas. b) Sensores alineados en la cara exterior de muro – Capa 2. c) Instalación de sensores en cámara.....	65
Figura 2.23 –	Potencia eléctrica calefactora y medida por HFS-Tiles. Secuencia ROLBS para invierno (derecha) y sin secuencia alguna en verano (izquierda).....	66
Figura 2.24 –	Caudal de extracción comparada con su señal de control en el periodo invernal.....	67
Figura 2.25 –	Caudal de extracción comparada con su señal de control en el periodo estival.....	67
Figura 2.26 –	Radiación solar directa incidente en plano horizontal y vertical, invierno.....	68
Figura 2.27 –	Radiación solar directa incidente en plano horizontal y vertical, verano.....	68
Figura 2.28 –	Evolución de temperaturas en las capas de fachada, marzo.....	69
Figura 2.29 –	Evolución de temperaturas en las capas de fachada, agosto.....	69
Figura 2.30 –	Altura de los sensores en cámara respecto a la cota de entrada de aire: 0,6; 1,2; 1,8 y 2,4 m.....	71
Figura 2.31 –	Variación de temperatura en altura para el eje central del caudal de aire en la cámara durante el periodo de ensayo en invierno.....	71
Figura 2.32 –	Radiación Global Horizontal y Vertical para el 6 de marzo, un día soleado.....	72
Figura 2.33 –	Variación de la temperatura media en cada una de las capas de la solución FVFF a lo largo de un día soleado de marzo.....	72
Figura 2.34 –	Variación horaria del perfil de temperatura en sección de la solución FVFF.....	73
Figura 2.35 –	Variación horaria de temperatura en altura para el eje central del caudal de aire en la cámara.....	74
Figura 2.36 –	Ganancia energética del caudal de aire en cámara durante el ensayo de invierno y comparación con la radiación incidente, expresadas en unidades de potencia instantánea (figura superior). Detalle de la misma comparativa en un día soleado (figura inferior).....	75
Figura 2.37 –	Rendimiento diario de la FVFF como captador solar térmico.....	76

Figura 2.38	Ganancia energética del caudal de aire en cámara durante el ensayo de verano y comparación con la radiación incidente, expresadas en unidades de potencia instantánea.	77
Figura 2.39	Rendimiento diario de la FVFF como captador solar térmico.	77
Figura 2.40	Caudal de extracción y velocidades de aire a diferentes alturas en el interior de la cámara en invierno.	78
Figura 2.41	Caudal de extracción y velocidades de aire a diferentes alturas en el interior de la cámara en verano.	79
Figura 2.42	Evolución horaria de las propiedades eléctricas de los vidrios fotovoltaicos durante el ensayo en marzo.	80
Figura 2.43	Generación eléctrica de las placas fotovoltaicas opacas con extracción forzada de aire el 6 de marzo.	80
Figura 2.44	Bombillas empleadas para la disipación de la energía producida por la fachada FVFF.	81
Figura 2.45	Generación eléctrica diaria durante el ensayo en invierno (izq.) y verano (der.).....	82
Figura 2.46	Energía neta diaria producida por las placas fotovoltaicas, radiación solar vertical incidente neta diaria y rendimiento de los paneles opacos durante los días de ensayo	82
Figura 3.	Representación esquemática de un modelo de caja negra.	87
Figura 3.2	Ejemplo de un modelo térmico de caja gris para una vivienda, adaptado de [139].	87
Figura 3.3	Ejemplo de aumento del detalle en un modelo de caja gris de edificio, adaptado de [141].	88
Figura 3.4	Modelo base de parámetros concentrados para la transmisión de calor en un cerramiento.	91
Figura 3.5	Modelo RC de la solución de fachada FVFF.	95
Figura 3.6	Modelo RC óptimo para representar la sala de ensayos de la célula EGUZKI.	97
Figura 3.7	Instantes de mayor coeficiente conductivo a lo largo del día 12 de marzo.	99
Figura 3.8	Subdivisión del muro de bloque de hormigón en seis nodos internos de temperatura.	102
Figura 3.9	Subdivisión de la capa de lana mineral con un nodo intermedio de temperatura.	105
Figura 3.10	Nodos de temperatura, calor ganado y conductancias en cámara de aire.	107
Figura 3.11	Elementos para la definición del ajuste Boltzmann.	108
Figura 3.12	Ajuste sigmoide de Boltzmann para la velocidad de aire en cámara durante el invierno.	109
Figura 3.13	Representación de la hoja de vidrios fotovoltaicos para el modelo numérico.	110
Figura 3.14	Mediciones en módulo de vidrio fotovoltaico opaco para estimar su densidad.	111
Figura 3.15	Algoritmo para la implementación del modelo numérico en herramienta de cálculo computacional (página 1/3).	115
Figura 3.16	Algoritmo para la implementación del modelo numérico en herramienta de cálculo computacional (página 2/3).	116
Figura 3.17	Algoritmo para la implementación del modelo numérico en herramienta de cálculo computacional (página 3/3).	117
Figura 3.18	Comparativa de valores medidos y calculados para las temperaturas T_2 , T_3 , T_5 y T_6 – invierno.	119
Figura 3.19	Comparativa de valores medidos y calculados para las temperaturas T_2 , T_3 , T_5 y T_6 – invierno.	120
Figura 3.20	Comparativa de la velocidad del flujo del aire en la cámara ventilada.	120
Figura 3.21	Ajuste sigmoide de Boltzmann para la velocidad de aire en cámara durante el invierno.	121

Figura 3.22 –	Comparativa de valores medidos y calculados para las temperaturas T_2 , T_3 , T_5 y T_6 – verano.....	122
Figura 3.23 –	Comparativa de valores medidos y calculados para las temperaturas T_2 , T_3 , T_5 y T_6 – invierno.....	122
Figura 4.1 –	Vista suroeste del edificio de referencia, incluyendo la planta sótano.....	127
Figura 4.2 –	Vista axonométrica noroeste del edificio de referencia, plantas sobre el terreno.	127
Figura 4.3 –	Vista axonométrica sureste del edificio de referencia, plantas sobre el terreno.....	128
Figura 4.4 –	Distribución en planta del proyecto arquitectónico del bloque de edificio.....	128
Figura 4.5 –	Representación en el modelo de simulación de la distribución de viviendas.....	128
Figura 4.6 –	Determinación de ocupación y consumo ACS a partir de la distribución interior.	132
Figura 4.7 –	Perfil horario para el consumo de ACS.....	132
Figura 4.8 –	Esquema global de las instalaciones del modelo de edificio para calefacción, ventilación y ACS.....	133
Figura 4.9 –	Circuito de agua caliente para calefacción de zona.....	134
Figura 4.10 –	Variación del COP para diferentes temperaturas de aplicación de la bomba de calor para calefacción.	134
Figura 4.11 –	Variación de la capacidad calorífica Q_h para diferentes temperaturas de aplicación de la bomba de calor para calefacción.....	135
Figura 4.12 –	Curva de capacidad de calefacción de la bomba Carrier 30RQS-120 en función de la temperatura de bulbo húmedo exterior en formato compatible con EnergyPlus....	137
Figura 4.13 –	Curva de COP de la bomba Carrier 30RQS-120 en función de la temperatura de bulbo húmedo exterior en formato compatible con EnergyPlus.....	137
Figura 4.14 –	Representación en DesignBuilder de una de las zonas acondicionadas HVAC con rejillas de ventilación y suelo radiante.	138
Figura 4.15 –	Circuito de agua caliente para calefacción de zona.....	139
Figura 4.16 –	Variación del COP para diferentes temperaturas de aplicación de la bomba de calor para ACS del modelo de edificio.....	140
Figura 4.17 –	Variación de la capacidad calorífica Q_h para diferentes temperaturas de aplicación de la bomba de calor para ACS del modelo de edificio.....	140
Figura 4.18 –	Curva de capacidad de calefacción de la bomba Carrier 61 AF-045 en función de la temperatura de bulbo húmedo exterior en formato compatible con EnergyPlus....	142
Figura 4.19 –	Curva de COP de la bomba Carrier 61 AF-045 en función de la temperatura de bulbo húmedo exterior en formato compatible con EnergyPlus.....	142
Figura 4.20 –	Definición de la demanda de ACS mediante el componente “Grupo da Salida de Agua”.....	143
Figura 4.21 –	Definición de la temperatura de agua de la red en los detalles del sitio del Modelo..	143
Figura 4.22 –	Programación de la temperatura de agua de red en el modelo para la ciudad de Madrid.	143
Figura 4.23 –	Esquema del circuito de aire de ventilación con recuperación de calor.....	144
Figura 4.24 –	Determinación del caudal de ventilación por persona a partir de los requerimientos de locales habitables.	145
Figura 4.25 –	Definición del tipo de carga que dimensiona el circuito de aire.	145
Figura 4.26 –	Definición del caudal de ventilación por persona en las propiedades de Zona HVAC.....	145
Figura 4.27 –	Programación de la temperatura de consigna interior de calefacción edificio de referencia.	146
Figura 4.28 –	Aspecto del modelo de edificio incorporando tramos de fachada FVFF en la cara sur.....	147

Figura 4.29 –	Geometrías de los carriles de módulos fotovoltaicos definidos para la FVFF y adaptación a franjas equivalentes	148
Figura 4.30 –	Definición de generación eléctrica en sitio a nivel de datos del modelo	149
Figura 4.31 –	Definición de los 29 elementos fotovoltaicos en el árbol del modelo FVFF	149
Figura 4.32 –	Definición de temperatura de aire de entrada a la bomba de calor en el modelo con FVFF.....	150
Figura 4.33 –	Temperatura media diaria interior en invierno de las 45 viviendas, edificio de referencia.	152
Figura 4.34 –	Valor horario de temperatura interior en viviendas del extremo este – caso referencia.	153
Figura 4.35 –	Valor instantáneo para la diferencia de temperatura del aire extraído de la FVFF con respecto al aire exterior, obtenido por el modelo numérico.....	154
Figura 4.36 –	Temperatura media diaria interior en invierno de las 45 viviendas, edificio con FVFF.....	154
Figura 4.37 –	Comparativa de los valores horarios en invierno de las temperaturas interiores de aire para los dos casos.....	155
Figura 4.38 –	Variación del COP para las Bombas de Calor de Calefacción y de ACS – 2ª semana de enero. Casos referencia vs FVFF con temperatura adaptativa.	156
Figura 4.39 –	Consumo eléctrico de las bombas de calor de calefacción y de ACS y electricidad generada por la hoja exterior de vidrios fotovoltaicos – 2ª semana de enero para el caso FVFF con temperatura adaptativa	157
Figura 5.1 –	Fachada Ventilada Fotovoltaica Opaca en un edificio en planta ático de edificio terciario.....	164

Lista de Tablas

Tabla 1.1 –	Parámetros característicos a partir de la bibliografía, de estudios experimentales y por simulación en la última década para BdcAS[39]	29
Tabla 2.1 –	Propiedades y parámetros del modelo del puente térmico para analizar el efecto de borde en el encuentro entre pared lateral y techo.....	55
Tabla 2.2. –	Correlación obtenida para el factor de corrección del efecto de borde en los encuentros longitudinales de la célula de ensayo. Efecto de borde de tipo T1.....	62
Tabla 2.3. –	Correlación obtenida para el factor de corrección del efecto de borde en la abertura sur de la célula de ensayo. Efectos de borde de tipo T2 y T3.	62
Tabla 2.4. –	Correlación obtenida para el factor de corrección de los efectos de borde en el muro de calibración. Efectos de borde de tipo CWT2 y CWT3.....	62
Tabla 2.5 –	Instrumentación para las condiciones climáticas exteriores de la zona PASLINK.	64
Tabla 2.6 –	Instrumentación de la sala de ensayos de la célula PASLINK.....	64
Tabla 2.7 –	Instrumentación dispuesta en la muestra FVFF.	65
Tabla 2.8 –	Valores de temperatura de referencia en los dos periodos de ensayo.....	70
Tabla 3.1 –	Variables definidas como entradas y salidas para la solución del modelo RC de la fachada FVFF	95
Tabla 3.2 –	Valores solución de los parámetros del modelo RC de la fachada FVFF ensayada	96
Tabla 3.3 –	Valores de los parámetros del modelo RC óptimo para la sala de ensayos EGUZKI. ...	97
Tabla 3.4 –	Parámetros empleados en la formulación del modelo para el muro de bloque de hormigón	102
Tabla 3.5 –	Parámetros empleados en la formulación del modelo para la capa de lana mineral.....	105
Tabla 3.6 –	Parámetros característicos de la hoja exterior formada por vidrios fotovoltaicos opacos.....	110
Tabla 4.1 –	Composición de las soluciones constructivas en el Modelo de referencia	130
Tabla 4.2 –	Parámetros definidos para el uso y ocupación del modelo del edificio.....	131
Tabla 4.3 –	Parámetros más relevantes en la definición de la bomba de calor para Calefacción.	135
Tabla 4.4 –	Parámetros más relevantes en la definición del suelo radiante.....	138
Tabla 4.5 –	Parámetros más relevantes en la definición de la Bomba de Calor de Calefacción.	141
Tabla 4.6 –	Principales indicadores de la mejora en la eficiencia energética del sistema y de su reducción asociada en el consumo energético	158

CAPITULO 1

Introducción y Objetivos

RESUMEN

Este primer capítulo contextualiza los antecedentes que dan lugar a la realización de la presente Tesis. Una vez que se presentan y discuten aspectos expuestos por las diversas fuentes que constituyen la revisión bibliográfica, se formulan los Objetivos de esta Tesis. Igualmente se hace una descripción de la estructura y metodología empleada para la consecución de los mismos.

1.1. Introducción.

1.1.1. Contexto actual.

El desarrollo económico e industrial alcanzado por las naciones modernas junto al nivel de confort asociado al mismo, ha convertido estas sociedades en importantes y crecientes demandantes de energía. En el caso Europeo, la tasa de dependencia energética de la Unión Europea (UE) - que muestra la proporción de energía que una economía debe importar -, ha pasado del 47% en el año 2000, al 61% en el 2019[1], lo que significa que la UE debe importar más de la mitad de la energía que consume.

Esta situación, unida a aspectos como la alta dependencia de fuentes energéticas de origen fósil, la concentración de dichas fuentes en un reducido número de países proveedores, la incertidumbre y falta de control sobre la evolución de sus precios y su enorme impacto en la economía y la inflación, constituyen un verdadero problema energético para la Unión

Por otra parte, este significativo consumo de energía de origen fósil también conlleva un grave impacto medio ambiental, tanto en el calentamiento global asociado a la emisión de gases de efecto invernadero, como a la polución que es causante de diversas afecciones a la población y que llega a estar implicada en casos de muertes prematuras [2]. Lógicamente no se trata de un problema que pueda solucionarse de forma natural, sino que se agrava en tanto no se tomen medidas políticas y estructurales que detengan e inviertan esta situación.

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC) de 1992 en Rio de Janeiro conocida como “Cumbre de la Tierra”[3], trasladó al mundo la necesidad de instaurar una reorganización basada en el concepto de desarrollo sostenible. Este había sido definido unos años antes como: “Satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas”[4]. Surge así la agenda 21, que marca las actuales iniciativas de reestructuración en los modelos energéticos y políticas medio ambientales a nivel internacional.

La UE ha sido una de las regiones más comprometidas con este enfoque, centrando sus esfuerzos en actuar en sectores clave del problema energético: la generación eléctrica, el transporte, la industria y la edificación [5]. Muestra de ello son las sucesivas Directivas de obligada trasposición a los Estados Miembros en los últimos 20 años. Se trata de políticas y actuaciones que por una parte buscan la reducción del consumo fomentando la mejora de la eficiencia energética en los sectores clave entre los que se incluye la edificación[6], y por otra la reducción de la dependencia energética aumentando la implantación de fuentes de energías renovables [7]. Incluso se han hecho actuaciones de valoración y acotación del impacto ambiental de las tecnologías, como es el caso del diseño y etiquetado ecológico[8]. Cabe destacar que gran parte de esta legislación comunitaria manifiesta la decidida y clara actitud de la UE para cumplir los compromisos establecidos por tratados internacionales derivados de la CMNUCC, como el protocolo de Kyoto [9][10] y más recientemente el tratado de París [11]. Acuerdos que se han originado en el marco de las sucesivas cumbres mundiales que se realizan desde 1994, conocidas como “Conference of the Parties (COP)” para el seguimiento de la agenda ambiental ratificada por los países de la CMNUCC, en las que normalmente son evaluados y rectificadas los acuerdos vigentes[12].

La edificación es un sector clave en el desafío energético por su importante peso en la demanda de energía[5], especialmente la requerida para mantener los edificios acondicionados acorde a los actuales estándares de confort térmico con calidad de aire. Como muestra de su importancia, se tiene que el consumo de energía final de los hogares europeos supone más de una cuarta parte del consumo total [13]. En este sector de la edificación, las actuaciones han evolucionado hacia el desarrollo de políticas, recursos y tecnologías que permitan edificar edificios con un nivel de eficiencia muy alto. Son los denominados “edificios de consumo de energía casi nulo”, conocidos por sus siglas nZEB. Este objetivo se aplica no solo a los edificios residenciales sino a todo tipo de edificio en general que sea consumidor de energía[14][15][16].

A pesar de su bajo nivel de consumo, el objetivo es que la energía finalmente consumida proceda preferentemente de fuentes de energía renovables, generada in situ o en las cercanías. En este sentido se está avanzando a una escala aún mayor, creando edificios o distritos con balance energético positivo, esto es, con exceso de generación energética que si se tratase de electricidad puede estar en disposición de alimentar la red o servir a edificios cercanos[17][18][19].

Dentro de las tecnologías que hacen posible edificar con tales condicionantes, la UE ha hecho una apuesta por la bomba de calor (BdC), citándola expresamente en sus Directivas [6][7]. El interés en la bomba de calor radica en su capacidad de aprovechar la energía térmica contenida en tres tipos de fuentes de energía catalogadas como renovables: la aerotermia, la geotermia y la hidrotermia [7]. La cantidad de energía renovable suministrada por una bomba de calor (“Renewable Energy Supplied E_{RES} ”), corresponde a una fracción del calor útil proporcionado por la bomba (Q_{usable}). Para HP eléctricas, solo se considera aporte renovable cuando su factor de rendimiento medio estacional ($SCOP_{net}$) es superior a 2,5 [20].

Las BdC eléctricas fabricadas actualmente suelen tener valores de SCOP en el rango de 2,5 a 5,5, con lo que se da por sentado su aporte renovable en condiciones nominales. Un aspecto importante es que actualmente este aporte solo es aplicable en la producción de calor (calefacción, ACS, piscinas, etc.) y no en el uso de refrigeración. De hecho las bombas de tipo reversible son analizadas en detalle para evitar sobrestimaciones del aporte renovable en modo calefacción [21]. Por cada grado centígrado que se eleva la temperatura de evaporación, una bomba de calor puede tener una mejora entre el 2 y 4% en su COP [22]. Por ello el uso de un foco térmico en el evaporador tal y como sucede con la geotermia de baja profundidad, permite obtener bombas de calor con mayores rendimientos. En el caso del subsuelo, la estabilidad de su temperatura a lo largo del año garantiza ese mayor rendimiento de la bomba independientemente de las condiciones ambientales, siempre y cuando el diseño, montaje y operación de la instalación haya sido idóneo.

La UE tiene una clara decisión por la descarbonización del sector energético, y por lo que se ha denominado como “la electrificación del calor” [23], verificando que exista una importante componente renovable en el proceso. Los objetivos para 2030 [24] y para 2050 [25] exigen un cambio tan notable, que el periodo de tiempo a partir del año 2020 se considera de “transición”. La HP es un equipo que jugará un papel protagonista en esta transición para el sector de la climatización [26].

En comparación con sistemas de calefacción central basados en caldera o calefacción eléctrica, incluso aquellos sensatamente diseñados, la BdC se ha mostrado como el sistema más eficiente y amigable con el medio ambiente para acondicionar térmicamente los espacios interiores[27].

Aunque se trata de una tecnología madura, todavía queda margen para la innovación, bien sea por su capacidad de combinarse con otras tecnologías para mejorar el rendimiento reduciendo el salto térmico entre sus dos focos de trabajo [28], o bien sea actuando en la termodinámica de sus componentes y del propio ciclo refrigerante [29].

En este sentido, y teniendo presente la conveniencia de usar la bomba de calor con un foco térmico proveniente de una fuente gratuita y renovable, surge la idea de combinarla con una fachada ventilada. Numerosos autores ha propuesto convertir a las fachadas en elementos solar activos[30][31] como una evolución de las primeras fachadas dobles acristaladas y los muros cortina, y esta cualidad solar activa resulta compatible con el concepto de apoyo solar a una BdC. Esta propuesta se comenta con más detalle más adelante, en el apartado 1.1.4.

1.1.2. Acoplamiento de fuentes de calor a una BdC para mejorar su rendimiento

La eficiencia de ciclo de una BdC es función directa de los dos niveles térmicos entre los cuales opera. Por tanto, resulta de interés aumentar la temperatura de su foco frío en aplicaciones de calefacción, o reducir la temperatura de su foco caliente en aplicaciones de refrigeración. Desde este punto de vista, una bomba de calor que trabaja de forma reversible puede configurarse de tal manera que se conecte con diferentes fuentes de calor o frío, según la estación del año, la temperatura estacional de la fuente de energía, y de las características de la demanda a servir.

Estas alternativas de operación y de conexión se consiguen técnicamente haciendo intercambio de calor con las diferentes fuentes de energía, bien sea de forma directa o bien sea de forma indirecta.

El intercambio directo consiste en derivar el circuito refrigerante a dispositivos de transferencia de calor en contacto con las fuentes de energía mediante válvulas controladas remotamente que administran el circuito y sentido del flujo de refrigerante que mueve la BdC. Por tanto, los componentes del ciclo de la BdC se arreglan en circuitos preparados para el aprovechamiento de las diferentes fuentes de calor, amplificando la cantidad de condensadores (o en su caso evaporadores) en tantas fuentes se dispongan, bien sea en arreglos paralelos, o bien sea en arreglos en serie (Figura 1.1).

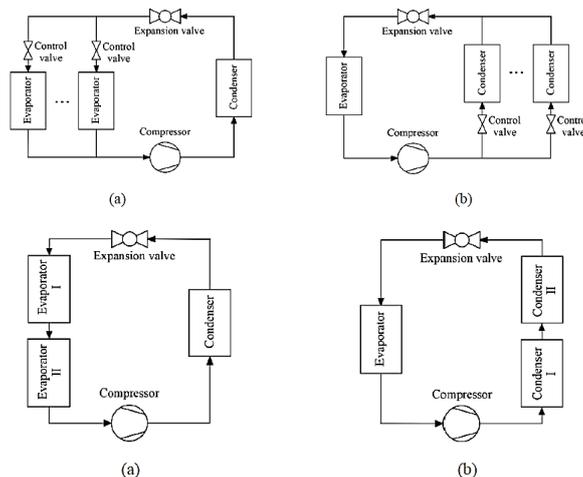


Figura 1.1. – Arreglo en paralelo o en serie de los componentes de una BdC

En el arreglo de fuentes de calor en paralelo, normalmente la BdC emplea una sola de las fuentes según resulte más conveniente. En muy raras ocasiones se emplea simultáneamente más de una fuente a la vez. En el arreglo con las fuentes en serie, también es habitual que esté activa una sola de ellas, aunque es posible que más de una fuente este activa, siendo más fácil de conseguir que en el caso del arreglo en paralelo.

En ciertas aplicaciones se diseñan condensadores o evaporadores capaces de operar a través de varios fenómenos de transferencia de calor de forma simultánea. Es el caso de Bombas de calor cuyos evaporadores son colectores solares con soportes aleteados; el equipo dispone de calor en el evaporador tanto por radiación solar directa, como de convección con el ambiente exterior, ocurriendo los dos de forma simultánea o prevaleciendo uno de los dos según las condiciones instantáneas (Figura 1.2). Otro ejemplo de este tipo de arreglos es un intercambiador de tubos coaxiales, con el tubo exterior aleteado; el refrigerante fluye por el conducto exterior mientras que un flujo de agua a contracorriente lo hace por el tubo interior, al tiempo que una corriente de aire impulsada por un ventilador incide sobre todo el componente. De esta manera el flujo de refrigerante interactúa de forma simultánea por conducción/convección con los dos flujos (Figura 1.3).

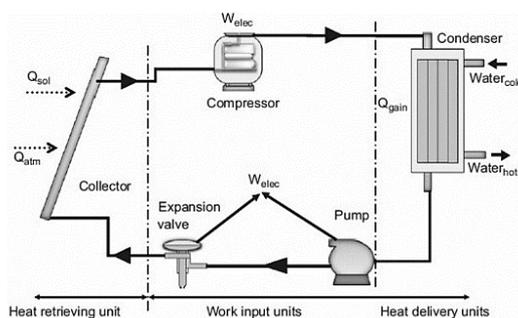


Figura 1.2. – Esquema de una bomba de calor con un colector solar como evaporador [32].

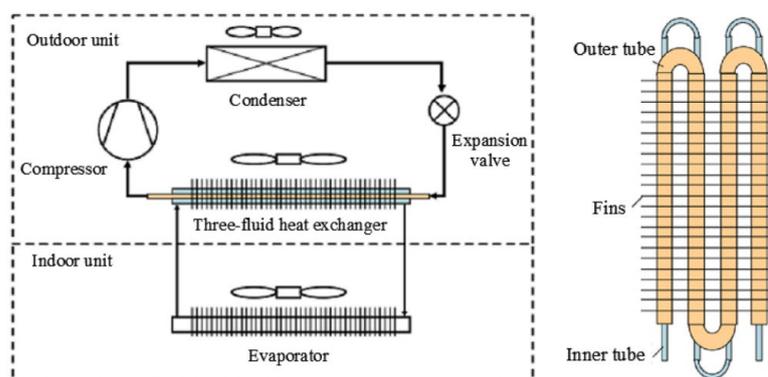
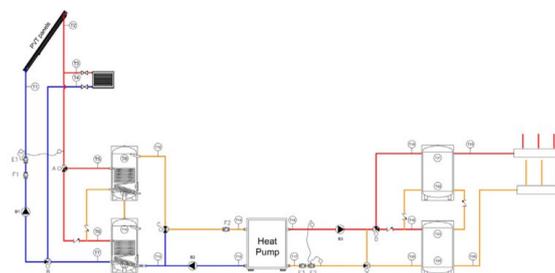


Figura 1.3. – Intercambiador de calor a tres flujos [33].

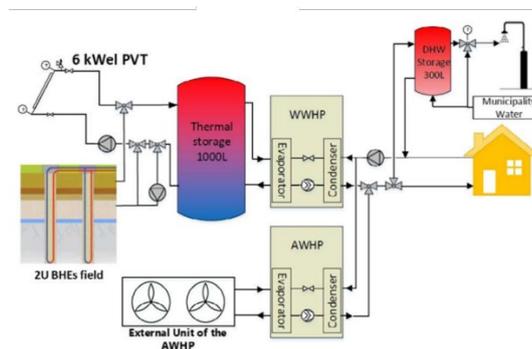
El intercambio de calor indirecto entre la BdC y las fuentes de energía consiste en recurrir a dispositivos y flujos intermedios que transfieren el calor desde las fuentes hasta el evaporador/condensador de la BdC. Este tipo de arreglo simplifica la instalación en el sentido de que pueden emplearse BdCs y dispositivos de diseño genérico y comercial, con la garantía y fiabilidad que ello proporciona.

La variedad de diseños de intercambio indirecto es muy amplia y depende de las características de la fuente energética disponible. También influye el que dicha fuente energética sea tan solo de apoyo o que se trate del foco energético principal de la BdC. Sin embargo, en términos generales el concepto base de un intercambio indirecto es el de transportar la energía desde las fuentes energéticas hasta un dispositivo de intercambio con el evaporador/condensador de la BdC, en el que se fusiona con aportes energéticos de otras fuentes o con la fuente de intercambio principal si es el caso. En ocasiones hay más de una fuente energética, y es el mecanismo de transporte el que se encarga de la gestión de estas.

En la Figura 1.4 se aprecia un ejemplo de instalación tanto de una fuente energética de apoyo (a) como más de una fuente (b). En estos casos un tanque de acumulación es el dispositivo que hace de puente indirecto y estabilizador para el transporte energético al evaporador de la BdC agua-agua. En general la disponibilidad de fuentes y el tipo de BdC terminan definiendo los mecanismos de conexión indirecta entre estas dos componentes. Por ejemplo: etapas de precalentamiento o preenfriamiento que hacen uso de fuentes con base en caudales de agua o de aire residuales procedentes de otros procesos o de otras energías renovables, la clásica instalación geotérmica, etc.



(a)



(b)

Figura 1.4. – Ejemplo de una instalación en intercambio indirecto: (a) con una fuente energética [34] y (b) con más de una fuente energética [35].

Se tiene entonces que diversas fuentes energéticas, ya sea primarias o ya sea secundarias como calor residual de otros procesos, pueden ser empleadas como apoyo a una BdC. Este trabajo está centrado en el uso de BdC aerotérmicas apoyadas por una fuente energética de origen solar, sistema del cual se exponen más detalles a continuación.

1.1.3. Bombas de Calor aerotérmicas asistidas por energía solar (BdCAS)

Sin duda el aporte de calor proveniente de aprovechamientos de la radiación solar, mejora el rendimiento de una bomba de calor aerotérmica en modo calefacción. A pesar de la conocida intermitencia de la intensidad de la radiación solar a lo largo del día, que hace que se trate de un apoyo inestable, el balance neto puede ser ventajoso por tratarse de una fuente ilimitada y gratuita. Por otra parte, en una aplicación de BdC por aerotermia convencional, que suministra calefacción, refrigeración y ACS, tendrá las limitaciones que puedan ocurrir debido a las condiciones meteorológicas, algo que implica prever sistemas auxiliares para no interrumpir la cobertura de la demanda. Con el apoyo solar, la necesidad de tales sistemas auxiliares se reduce o incluso se omite dependiendo de la situación. Estas razones han causado que las comunidades académica y tecnológica hayan explorado este tipo de aprovechamiento en numerosas propuestas de combinaciones y casos de estudio.

De hecho, hay plataformas tecnológicas para la colaboración internacional dentro de la Agencia Internacional de la energía (IEA) enfocadas al desarrollo del concepto de sistemas solares y bombas de calor. Entre los años 2010 a 2013 se desarrolló el “Solar Heating and Cooling Programme (SHC)” a través del grupo “Task 44” en combinación con el “Heat Pump Programme (HPP)” a través del Annex 38 [36]. Más recientemente, dentro del mismo programa SHC se ha desarrollado el grupo “SHC Task 53: New Generation Solar Cooling & Heating s (PV or solar thermally driven systems)” [37].

Estas plataformas han definido cartas que de forma esquemática resumen el flujo energético para las posibles combinaciones de fuentes energéticas y bombas de calor, identificando las fronteras de transferencia de los sistemas. En el caso de aerotermia con apoyo solar, se tienen los flujos y fronteras del sistema que se aprecian en la Figura 1.5. Las fuentes de energía son identificadas con color verde, mientras que energía comprada a red se identifica con color gris. Los cuadros de color rojo a la derecha de la figura representan energía suministrada a usuarios.

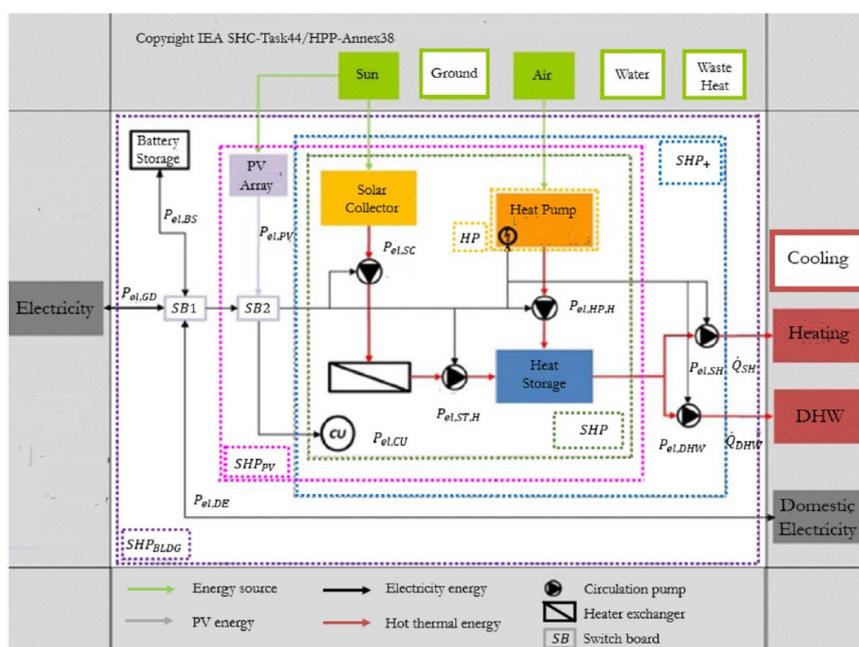


Figura 1.5. – Carta de flujo energético y de fronteras de un sistema BdCAS (Task 53 [37]).

Acorde a las posibilidades de combinación en la Figura 1.5, se tendrían diferentes opciones de clasificar a un sistema BdCAS. Por ejemplo una BdCAS que incluya las bombas de circulación, esta designada como “SHP+”, mientras que los límites definidos para una “HP” o una “SHP” no incluyen tales bombas. También pueden clasificarse según el tipo de demanda de calor que deben servir, ya sea calefacción o ACS [38].

Otro tipo de categorización proviene del tipo de interacción que hay entre la BdC y el sistema solar de apoyo [39]. De esta manera se tienen Bombas de Calor asistidas por energía solar térmica (ST-BdCAS), Bombas de calor asistidas por energía solar fotovoltaica (FV-BdCAS) y Bombas de Calor asistidas simultáneamente por estos dos tipos de energía solar (FV/ST-BdCAS).

El apoyo solar térmico puede implementarse ya sea modificando el ciclo refrigerante para integrar directamente el evaporador al colector o ya sea mediante un sistema indirecto de acoplamiento y transferencia.

Cuando el apoyo se hace de forma directa, el ciclo del refrigerante tiene un evaporador que intercambia con el aire, y otro que corresponde al colector solar térmico, los cuales pueden estar arreglados en paralelo o en serie (Figura 1.6).

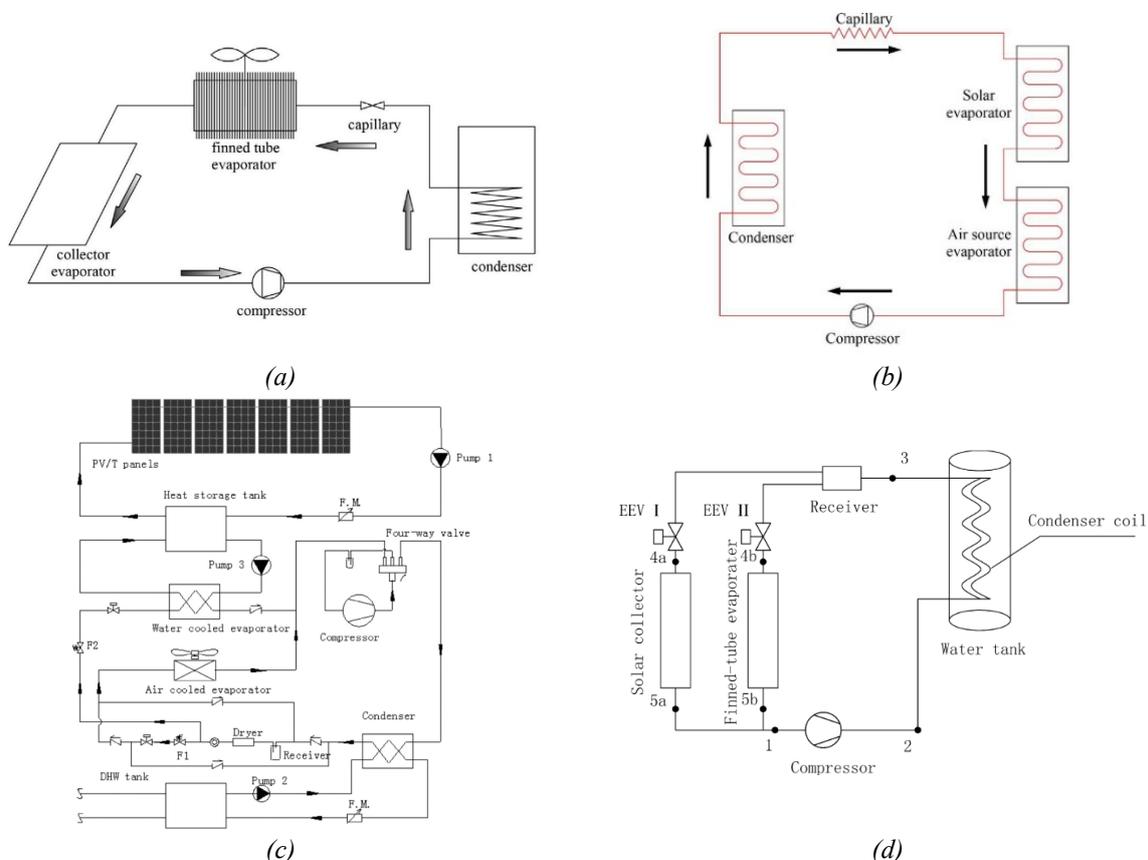


Figura 1.6. – Apoyo solar térmico directo con colector solar en serie teniendo el evaporador antes que el colector (a)[40], y al contrario (b)[41], y con colectores en paralelo en (c)[42] y (d)[43].

En el apoyo solar térmico de forma indirecta el ciclo de refrigerante y el sistema solar se combinan para trabajar juntos en un sistema mixto, en arreglos en los que los dos sistemas pueden estar dispuestos en serie, paralelo y regenerativo (Figura 1.7).

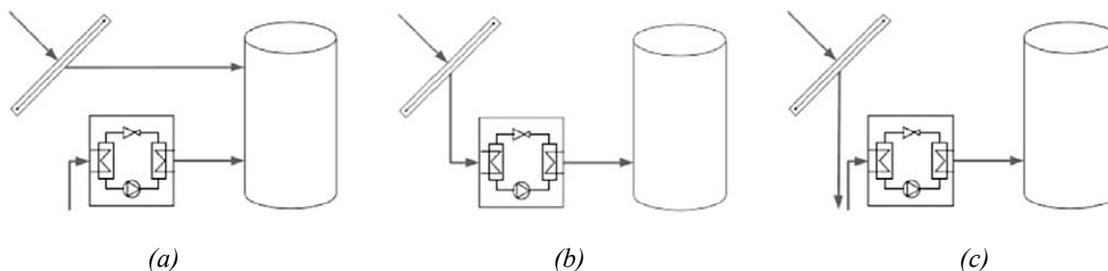


Figura 1.7. –Apoyo solar térmico indirecto con sistemas en paralelo (a), en serie (b) y regenerativo (c)[44]

El apoyo mediante paneles fotovoltaicos fundamentalmente consiste en la cobertura parcial del consumo eléctrico de la BdC a partir de la generación fotovoltaica, ya sea de un campo de paneles como tal, o de elementos integrados al edificio.

Finalmente, los sistemas FV/ST-BdCAS aprovechan la necesidad de disipación de calor que tienen los paneles fotovoltaicos para usarlos simultáneamente como paneles fotovoltaicos y térmicos. Dependiendo de la forma de disipación del calor generado se tendrían al menos cinco tipos de refrigeración de paneles FV/ST[45]: por aire, por agua, por ambos aire y agua, empleando materiales de cambio de fase y también empleando tubos del tipo termosifón (heat pipes). En el caso del uso de aire o agua como medios de disipación de los paneles, la ganancia de calor de estos fluidos es aprovechada en el evaporador de la BdC.

Wang et al [39] resumieron los valores característicos que se indican en la Tabla 1.1 para los tres tipos de sistemas de apoyo solar considerados (ST-BdCAS, FV-BdCAS y FV/ST-BdCAS), en base en los resultados reportados en la última década por diversos estudios de simulación [43], [44], [54]–[58], [46]–[53] y por una serie de estudios experimentales [59], [60], [69], [70], [61]–[68].

Tabla 1.1 – Parámetros característicos a partir de la bibliografía, de estudios experimentales y por simulación en la última década para BdCAS[39]

Sistema	Ventajas	Desventajas	COP Promedio
ST-BdCAS	Alta eficiencia Tiempo de retorno más cortos Instalación menos exigente	Más sensible al ambiente La menor inversión	2,90
FV-BdCAS	Ahorro de consumo eléctrico, llegando a alimentar otros equipos BdC con el COP más alto Menor Potencia de entrada	Más inversión El problema de almacenar la electricidad Sensible a las condiciones de irradiación Instalación más compleja	3,75
FV/ST-BdCAS	Máximo aprovechamiento de la energía solar Calor y electricidad simultáneos La mayor producción energética con el consumo más bajo	Con la mayor inversión Con el sistema y control más complejo Mayores problemas de instalación y mantenimiento Tiempo de retorno mayor	3,03

1.1.4. Uso de la envolvente como elemento solar activo y su integración con las instalaciones energéticas del edificio.

Obtener aire precalentado a través de la envolvente y que luego sea empleado como fuente energética para el edificio, es una vía de trabajo interesante para el apoyo solar a un BdC aunque también y más comúnmente, este flujo de aire precalentado es destinado a ventilación.

Una forma de precalentar aire a través de la envolvente y que pueda ser destinado como apoyo a la BdC es el uso de una cubierta elevada como la propuesta por Manzolini et al[67], y que se aprecia esquemáticamente en la Figura 1.8. El aire que discurre bajo la cubierta puede conseguir una elevación de temperatura entre 6 y 8 °C antes de llegar al evaporador ubicado en la cumbre, reduciendo hasta en un 5% el consumo energético de la bomba.

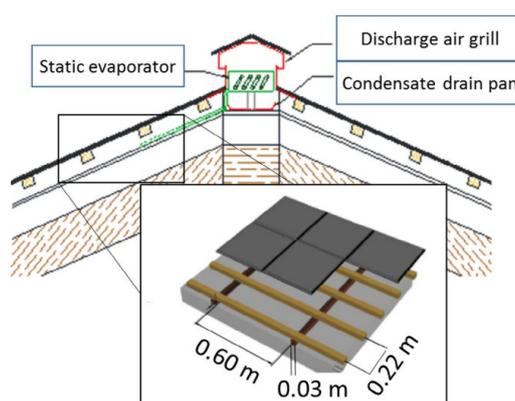


Figura 1.8. – Esquema de una cubierta inclinada con tejas fotovoltaicas, elevada para producir aire precalentado hacia el evaporador en cumbre [67].

Por otra parte, tal y como se ha comentado, en el campo del ahorro energético muchos autores proponen convertir a las fachadas en elementos solar activos [30] [31].

Las fachadas de doble piel, acristaladas u opacas, ventiladas o estancas, se han convertido en una solución arquitectónica consolidada de uso generalizado porque facilitan el montaje manteniendo alta calidad estética[71]. Se caracterizan por su versatilidad ofreciendo infinidad de configuraciones[72], razón por la cual, a pesar de que han sido investigadas a lo largo de las últimas tres décadas siguen siendo objeto de desarrollo y estudio[73]. Se tiene entonces que las doble fachadas ventiladas son aprovechadas como elementos de ganancia energética solar, tanto a nivel solar térmico diseñándolas a manera de captador solar térmico[74], como solar fotovoltaico usando en la hoja exterior elementos fotovoltaicos integrables a la edificación (BIPV)[75].

En la literatura se detecta que la aplicación más habitual y más estudiada hasta la fecha es la de integrar la doble fachada ventilada con el sistema de ventilación[76]. De esta manera se aporta aire precalentado al sistema de ventilación en invierno, o se controla la dirección del flujo de aire para que refrigere la envolvente en verano[77]. Sin embargo, otra forma de aprovechamiento del aire precalentado en fachada y que ha sido menos estudiada, es usarlo como fuente de energía para una bomba de calor[74][78]. La necesidad de conducir caudal de aire hasta la bomba de calor implica que la fachada tenga una ventilación forzada. El consumo

eléctrico extra debido al uso de ventiladores refuerza la conveniencia de dotar a la fachada de elementos BIPV.

Entre los pocos estudios realizados de integración de una doble fachada ventilada fotovoltaica forzada con una bomba de calor, uno de los más completos es el realizado por S. Li et al [79]. Plantea la integración conjugada eléctrica y térmica de una doble fachada BIPV/T del tipo “unglazed transpired solar collector (UTC)” a la calefacción por suelo radiante y a la ventilación de una zona de un edificio de oficinas posteriormente analizado por simulación. El calentamiento del aire en la fachada es determinado mediante un modelo desarrollado en un estudio anterior [80][81]. En la Figura 1.9 se aprecia el aspecto de los módulos empleados para la caracterización y modelado de estas soluciones[80], con unas dimensiones de 1,85 x 1,52 m con y sin elementos fotovoltaicos. Sin embargo a la hora de extrapolar estos diseños al caso de estudio expuesto en [79], resulta llamativo que con un cubrimiento parcial de fachada y en una sola planta, el dispositivo es capaz de hacer aportes eléctricos y térmicos significativos tanto para la calefacción como la ventilación, funcionando con un caudal del orden de 5600 m³/h en tan solo 65 m². En resumen, aunque es un estudio muy detallado resulta muy específico para el diseño de fachada y caso de estudio propuesto.



Figura 1.9. – Aspecto de un módulo del tipo (a) “unglazed transpired solar collector (UTC)” y (b) UTC con módulos fotovoltaicos, usados en la experimentación de [80].

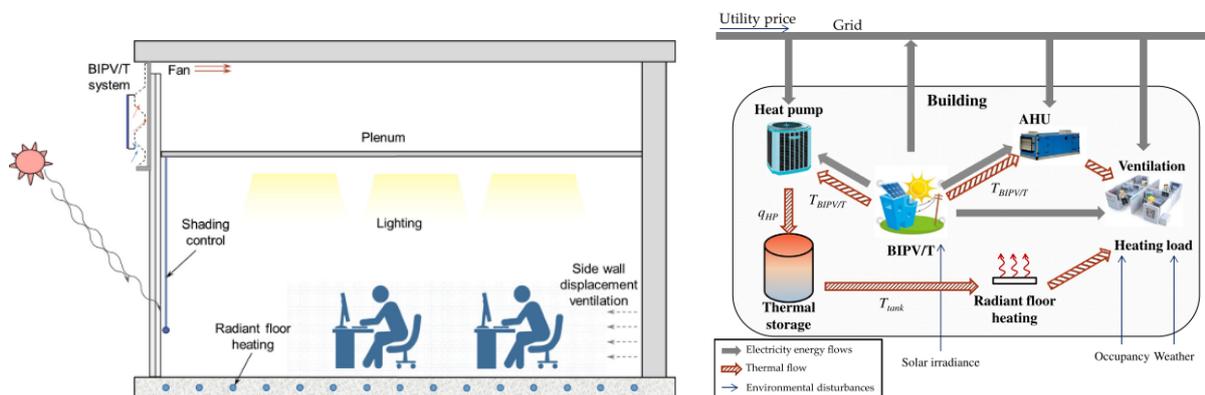


Figura 1.10. – Caso de estudio para los colectores UTC abasteciendo tanto ventilación como calefacción y electricidad, a pesar de su poca superficie en relación al edificio[79].

Otro estudio en esta misma línea es el desarrollado por K. Martin et al [82], en el que la fachada usa una hoja exterior de vidrios fotovoltaicos y se toma como caso de estudio la simulación de un edificio de viviendas (Figura 1.11). Es una propuesta interesante y práctica que también sirve de base a la propuesta desarrollada en esta Tesis. A diferencia del trabajo que aquí será expuesto, el punto de partida para el análisis de [82] se fundamenta en un balance teórico de flujos de calor. En la presente Tesis el punto de partida se basa en una caracterización

experimental en condiciones exteriores. Así mismo, el análisis a escala de edificio aquí expuesto va más allá de lo realizado por [82], al explorar el efecto de una estrategia que incorpora la inercia del propio edificio, prescindiendo de la caldera de apoyo y abasteciendo la demanda de calefacción y ACS del edificio exclusivamente con BdC.

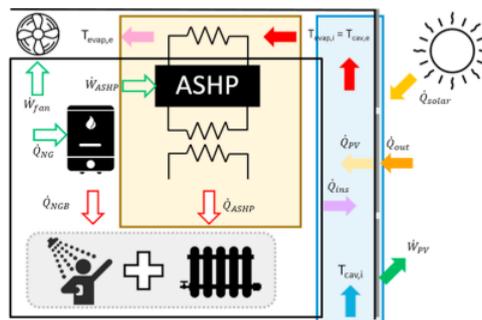


Figura 1.11. – Esquema del sistema dual propuesto por K. Martín[82].

En ambos estudios, [79] y [82], el análisis se fundamenta en balances energéticos, y sin embargo, no confirman explícitamente el aspecto técnico de que el caudal de aire calentado en fachada cubra los requerimientos de caudal de la bomba de calor.

1.1.5. Modelado de fachadas ventiladas solar activas

Las fachadas ventiladas fotovoltaicas forzadas (FVFF) son soluciones singulares muy dependientes del diseño y operación con que se hayan definido en proyecto. Esta singularidad causa que los modelos desarrollados para predecir su funcionamiento sean muy específicos y por tanto acotados en cuanto a su capacidad de ser aplicados a otros casos[75][83][84][85]. En lo relativo al método de obtención del modelo, los modelos de parámetros concentrados son elegidos por su capacidad de representar soluciones constructivas de forma simplificada, con igual precisión que modelos analíticos y menor esfuerzo computacional[81][86].

Normalmente los modelos reciben una validación contrastada con datos experimentales provenientes de monitorizaciones genéricas in situ[87][88], pero resulta más representativo que esos datos provengan de ensayos detallados y con suficiente extensión temporal como para recoger una variabilidad significativa en las condiciones de funcionamiento[89]. Los datos de referencia para la validación también pueden provenir de simulaciones CFD o una combinación de estas con datos experimentales, acotando aún más el campo de aplicación del modelo[90][91]. Así mismo, en ocasiones el estudio se centra en la ganancia energética solar térmica y eléctrica de la fachada, contabilizándola directamente en los balances energéticos del edificio con una escasa comprobación de la viabilidad técnica y termo-física que tal integración pueda implicar.

Ioannidis et al[92] realizaron un estudio que intenta cubrir todos los aspectos anteriormente comentados, desarrollando un modelo matemático paramétrico de uso general que pueda ser usado como herramienta de evaluación en el diseño de una doble fachada ventilada fotovoltaica. Es un modelo amplio que contempla diversos escenarios de funcionamiento, y uno de ellos es precisamente el acoplamiento del aire precalentado a una bomba de calor. Sin embargo, a pesar

de que recurre a datos experimentales de un estudio anterior [93], no profundiza en la validación experimental ni en el modelo de edificio.

El carácter específico y singular de los modelos desarrollados, hace que su ámbito de aplicación este acotado a las soluciones y modos de operación por estos representada. Por esta razón, en la presente Tesis se hace un modelado propio de la solución de fachada analizada que recoge sus modos de operación y de control, modelo que es obtenido y validado a partir de la detallada caracterización térmica previa. Es posible realizar labores de contrastación de modelos ya publicados contra los datos experimentales, pero tal labor no garantizaba obtener la calidad de precisión y fiabilidad que aportó el realizar un modelo propio.

1.1.6. Uso de la estructura del edificio como dispositivo acumulador térmico: BaB “building as battery”.

Como todo aprovechamiento basado en energía solar, el beneficio energético obtenido de esta fuente sostenible y gratuita es mayor si se dispone de un mecanismo de almacenamiento para la energía absorbida. Algo cuyo efecto es mucho más notorio en los casos en los que la demanda y la generación energética no coinciden en el tiempo.

Tal y como se expondrá en el desarrollo de la presente Tesis, tras los primeros resultados del análisis a escala de edificio se evidenció la importancia de una estrategia de gestión para el aprovechamiento de la ganancia energética solar en fachada. La estrategia adoptada ha sido la de emplear la propia estructura del edificio como elemento de acumulación térmica.

A este concepto se le denomina también como la activación dinámica de la masa térmica estructural del edificio, que en algunos estudios ha sido propuesto como un mecanismo de gestión de las generación energética in situ a nivel de distrito[94].

Marta J. N. et al [95] plantearon usar la capacidad térmica estructural del edificio como medio de almacenamiento de calor en invierno, en un concepto denominado “building as battery” (BaB). Para ello proponen variar la temperatura de consigna de la temperatura interior, a un valor fijo y predefinido entre 23 – 26 °C durante un periodo de ‘carga’ térmica de dos o cuatro horas dependiendo de la ocupación y el perfil del usuario (Figura 1.12). El estudio estaba acotado a un clima de invierno moderado en el que determinaron una eficiencia de acumulación entre 40 y 80%, para tres recintos desde bajo aislamiento hasta nivel pasivo (Figura 1.13). Esta eficiencia se entiende como aquella fracción de la energía extra aportada en el ciclo de carga y que es finalmente aprovechada en la calefacción del edificio. Sin embargo, en su estudio no establecen la reducción neta en el consumo anual. Aunque dicho estudio fue realizado mediante un sistema directo de radiador eléctrico, los autores postulan esta estrategia como uno de los mecanismos que puede incrementar la penetración de la energía renovable fotovoltaica (PV RE) de producción local en el mix energético del sector residencial, debido a que puede ser aplicado a sistemas de bombas de calor con apoyo PV RE (PV RE powered heat pump). Adicionalmente, esta forma de funcionamiento da lugar a la obtención de edificios residenciales energéticamente flexibles [96], un concepto que favorece la optimización de la propia red energética [97].

En la presente Tesis se emplea una estrategia de acumulación energética térmica para el caso de estudio a nivel de edificio, similar a la empleada por [95], que en este caso se ha denominado temperatura adaptativa.

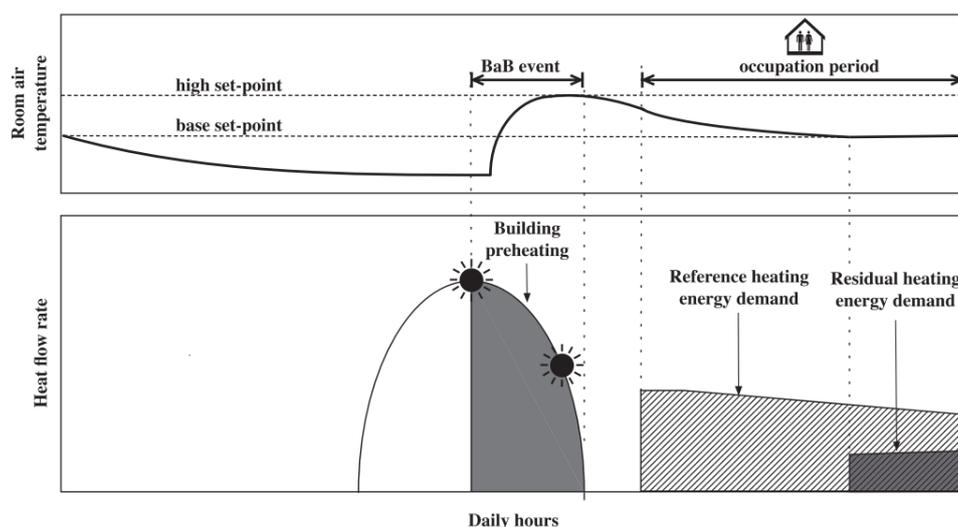


Figura 1.12. – Representación esquemática de un evento BaB precediendo el periodo de ocupación [95].

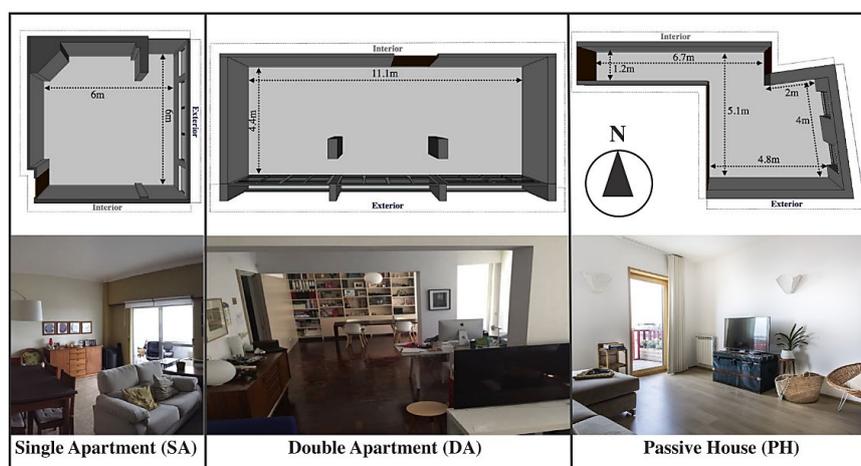


Figura 1.13. – Aspecto de los tres salones de las tres viviendas empleadas para el estudio de [95]

1.1.7. Investigación propuesta y metodología

La investigación expuesta en la presente Tesis se enfoca en la aplicación menos estudiada del uso de la fachada ventilada fotovoltaica forzada (FVFF) como fuente de energía para una bomba de calor, no solo por su capacidad de generación eléctrica sino también por su capacidad de precalentamiento del flujo de aire circulante por su cámara interior.

Es un estudio integral, que cierra el círculo desde la caracterización experimental hasta el análisis a nivel de edificio, pasando por el desarrollo de un modelo matemático. A diferencia de estudios previos, en el presente estudio no solo se demuestra el potencial de la FVFF como fuente de calor, sino también la importancia de una estrategia de transferencia de la energía térmica al sistema edificio cuando la FVFF es empleada como sistema de apoyo a la bomba de calor.

La metodología empleada implica tres etapas realizadas con alto nivel de detalle. La primera etapa corresponde a la caracterización térmica experimental en condiciones reales

exteriores de una muestra de la solución FVFF. El método de ensayo empleado fue el establecido por la red PASLINK[98] mediante el uso de la célula de ensayos EGUZKI [99] del Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco (LCCE) [100]. La caracterización térmica se realizó tanto en condiciones de invierno como de verano.

La segunda etapa del estudio comprende la obtención de un modelo matemático de la fachada. Tal y como se ha comentado, la singularidad de estas soluciones de fachada hace que los modelos desarrollados correspondan a condiciones específicas de diseño y operación. En el caso de la FVFF analizada, se tiene la singularidad de que modula el nivel de caudal de aire forzado a través de la cámara en dos niveles: bajo caudal de 20 l/s y alto caudal de 200 l/s. El funcionamiento en alto caudal ocurre cuando se detecta que la temperatura superficial exterior en la hoja fotovoltaica es 5° C superior a la temperatura ambiente exterior, algo definido como operación en “modo ganancia”. De lo contrario, el caudal de extracción se ajusta a bajo caudal. Las diferencias observadas durante la etapa experimental para el comportamiento térmico superficial de la cámara de aire en los distintos modos de funcionamiento de la fachada, también reforzaron la necesidad de un modelo matemático adaptado que las representará con detalle. El modelo matemático obtenido es de tipo numérico, desarrollado sobre la base de un modelo de parámetros concentrados resultante del ensayo PASLINK.

Finalmente, la tercera etapa consiste en un análisis a nivel de edificio mediante la simulación de un caso de estudio, empleando el software de simulación energética DesignBuilder. En esta etapa ha sido crucial poder integrar en cada paso de tiempo de simulación, el calentamiento predicho para el flujo de aire en la FVFF. Catto Lucchino et al[101] recomiendan contar siempre con datos experimentales cuando se incorpora un elemento de Doble Fachada en una herramienta de simulación energética de edificio (BES), de tal forma que se pueda validar el efecto de este elemento en el comportamiento energético del edificio entero. En este sentido, la simulación del edificio analizado está respaldada por el detallado proceso de validación realizado durante la etapa de desarrollo del modelo matemático de fachada.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta Tesis es demostrar que una fachada ventilada fotovoltaica con extracción forzada (FVFF), es una alternativa energética para satisfacer parcialmente las necesidades de calor de los edificios de manera renovable.

Una vez que la solución FVFF es integrada con las instalaciones energéticas, su efecto es el de transferir energía de origen solar al interior del edificio. Esto le confiere un carácter de tecnología energética de fuente renovable in situ. Por tanto, la FVFF contribuye a la obtención y/o optimización de edificios de consumo casi nulo (EECN) al reducir el consumo energético de fuentes externas.

Para maximizar las cualidades de captación solar térmica de la fachada FVFF, la operación de la fachada tiene un control de funcionamiento de tipo activo, modulando en dos niveles el flujo de caudal en la cámara. La premisa de control es: a mayor incidencia solar, mayor capacidad de captación; esto se consigue aumentando la masa de aire que cruza la cámara.

La consecución de este objetivo principal implica el planteamiento de los siguientes objetivos secundarios:

- Caracterizar térmicamente con ensayos en condiciones dinámicas exteriores una muestra de la solución de fachada FVFF, tanto en condiciones de invierno como de verano.
- Generar un universo de datos experimentales detallado y riguroso para la posterior modelización de la muestra. Como paso previo, se va a tratar de aumentar la precisión de la célula de ensayos. Para esto se dará continuidad a una investigación previa relativa al desarrollo de un método de reducción del efecto de los factores de borde en la medida del flujo de calor.
- Valorar el potencial de la solución de fachada como foco térmico a partir del comportamiento observado en la caracterización térmica, así como la capacidad de extrapolación de los resultados de ensayo de la muestra a una fachada entera.
- Desarrollar un modelo matemático que mediante diferencias finitas permita determinar el aumento de temperatura en el aire del flujo extraído de la cámara. El ajuste y la validación del modelo estarán basados tanto en los datos experimentales de invierno como en los de verano. El modelo deberá ser capaz de predecir el aumento de temperatura del aire en la cámara para cualquier otra serie de datos climatológicos.
- Desarrollar una estrategia que responda al reto de transferir al interior del edificio la energía solar de baja temperatura captada por la fachada tratando de acoplar de la mejor manera la generación y la demanda. Dicha estrategia será verificada mediante un análisis por simulación.
- En el análisis a escala de edificio por simulación, determinar el impacto de la implementación de la FVFF a partir de la comparativa de un caso base con fachada tradicional y un caso con solución FVFF.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

El trabajo desarrollado en la presente Tesis se expone en cinco capítulos, junto con referencias y material anexo.

El presente capítulo uno: *“Introducción, Estado del Arte, Objetivos y Metodología”*, constituye el capítulo introductorio en el que se justifica la necesidad y se establecen los objetivos de esta Tesis.

Seguidamente hay tres capítulos en los que se desarrolla la investigación. Como se ha comentado, el aporte al conocimiento que hace la presente Tesis es el resultado de un estudio integral que ha implicado tres etapas diferenciadas e interconectadas. Estas tres etapas son las que dan lugar a los capítulos dos, tres y cuatro respectivamente.

El capítulo dos: *“Caracterización Térmica Experimental”* describe el ensayo en condiciones reales exteriores en una célula PASLINK de una muestra de la solución FVFF. Esta etapa experimental a su vez implicó dos subetapas: inicialmente una etapa analítica de mejora en la precisión de la célula PASLINK y seguidamente la etapa experimental en sí. Esta etapa implicó ensayos tanto en invierno como en verano. En este capítulo se describe con detalle la configuración de la muestra, la estrategia de los ensayos y el análisis de los resultados registrados.

En el capítulo tres: *“Modelo matemático de diferencias finitas para determinar la temperatura en la cámara de la FVFF”*, se describe el proceso de obtención, ajuste y validación de un modelo de diferencias finitas que permite determinar la ganancia de temperatura del flujo de aire en su paso por la cámara de la fachada. Este modelo de diferencias finitas se construye sobre la base de un modelo de parámetros concentrados resuelto por las técnicas iterativas y estadísticas del método de ensayo PASLINK. El modelo producto de este capítulo sirve de puente para conectar la caracterización experimental del capítulo dos con el análisis a escala de edificio llevado a cabo en el capítulo cuatro.

El Capítulo cuatro *“Análisis a escala de edificio de la FVFF”* corresponde a la simulación energética de un modelo de edificio tomado como caso de estudio. Se describe con detalle la definición del modelo de edificio, el cual se ha basado en los criterios establecidos por el Código Técnico de la Edificación, tanto en envolvente como en uso. Igualmente, se da relevancia al tratamiento de las instalaciones de calefacción y ACS basadas en bombas de calor aerotérmicas correspondientes a modelos comerciales reales. El capítulo finaliza con una comparativa de los resultados obtenidos al simular el modelo de edificio con y sin implementar la solución FVFF. De esta manera se determina el impacto de la FVFF en el ahorro energético dando relevancia a la estrategia encontrada para optimizar la transferencia de la energía térmica al edificio. Dicha estrategia consiste en convertir al propio edificio en acumulador durante los periodos de mayor generación energética en la fachada, mediante una temperatura de consigna interior adaptativa.

En el capítulo cinco *“Conclusiones y futuras líneas de investigación”* se resumen los aportes, observaciones e hipótesis que constituyen el resultado de todo el trabajo desarrollado. También se establece el grado de consecución de los objetivos de la Tesis. Finalmente se exponen las líneas de futura investigación, que quedan abiertas como resultado de las conclusiones obtenidas.

El aporte al conocimiento hecho por la presente Tesis ha sido transmitido a la comunidad científica mediante dos publicaciones en revista internacional indexada, las cuales son incluidas en el apartado de anexos.

CAPITULO 2

Caracterización Térmica Experimental

RESUMEN

El presente capítulo describe en detalle la caracterización experimental de una muestra de la solución de Fachada Ventilada Forzada Fotovoltaica referencia de esta Tesis. El ensayo realizado en condiciones reales y siguiendo el método PASLINK aporta datos con el suficiente nivel de detalle y de calidad para su posterior modelado. El trabajo se desarrolló en dos etapas: inicialmente una etapa analítica de mejora en la precisión de la célula PASLINK como continuación del trabajo planteado por C. Escudero; seguidamente, la etapa experimental con ensayos tanto en invierno como en verano. La muestra demostró un importante potencial de captación solar térmica y un suficiente grado de representatividad, como para ser extrapolada al posterior análisis a nivel edificio.

2.1. Introducción.

La caracterización térmica experimental de la muestra de FVFF debía cubrir dos aspectos fundamentales: por una parte demostrar que la solución de fachada tenía potencial de captación energética solar mediante un importante aumento en la temperatura del caudal de aire forzado a través de la cámara; y por otra parte, aportar una ingente cantidad de datos detallados y de calidad para estar en capacidad de obtener un modelo predictivo fiable de la respuesta térmica de esta fachada, en función las condiciones de radiación y temperatura exterior.

En la literatura se dispone de estudios y modelizaciones de fachadas ventiladas similares, pero la solución propuesta tiene varias cualidades singulares. La hoja exterior es un vidrio fotovoltaico en lugar de un habitual y más costoso módulo fotovoltaico integrable en fachada, de los del tipo BIPV. El aire en cámara permanece en flujo constante mediante extracción forzada teniendo dos posibles niveles de caudal: un caudal bajo en periodos nublados o nocturnos y un caudal alto en periodos soleados de ganancia térmica. A su vez, los periodos de ganancia térmica se definieron como aquellos en los que la superficie exterior de la hoja exterior de fachada estaba 5 °C por encima de la temperatura exterior. Se trata entonces de una propuesta singular por estructura y operación que requería su propia caracterización y posterior modelización.

Para la ejecución de los ensayos se dispuso de una célula de ensayos en condiciones exteriores acorde con el método PASLINK, y se programaron dos campañas de ensayo, una en condiciones de invierno y otra en verano. A lo largo del capítulo se describen en detalle las características y requisitos de este método de ensayo, implantado en el Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación (LCCE) ubicado en Vitoria-Gasteiz. El grupo de investigación ENEDI, responsable de este equipo, cuenta con una destacada trayectoria y desarrollo de destrezas en la ejecución de los ensayos PASLINK generando continuamente publicaciones y tesis doctorales. Precisamente, en su tesis doctoral C. Escudero[102] plantea un método de mejora de la precisión del ensayo, centrándose en un mayor tratamiento del error en la determinación del flujo de calor que cruza las paredes de la célula debido al efecto de borde en las equinas interiores.

Antes de trabajar con los ensayos de la muestra de FVFF, se procedió a la implementación del método planteado por C. Escudero en el tratamiento de los datos de la célula de ensayos. Esta implementación se hizo con base en los datos del ensayo inicial de la célula PASLINK llamado ensayo de calibración. Se observó que el método planteado podía ser optimizado aún más mediante una técnica desarrollada en esta tesis y que se ha denominado “*de coeficientes de igualdad*” en lugar de la de equivalencia de pendientes inicialmente planteada por su autor.

Por tanto, el presente capítulo experimental está estructurado en un apartado inicial, el apartado 2.2 en que se describe el proceso de mejora de la precisión de determinación del flujo de calor en la célula PASLINK, y los siguientes apartados dedicados a la caracterización experimental de la muestra FVFF en sí.

2.2. Mejora de la precisión de determinación del flujo de calor en la célula PASLINK

La célula absoluta calibrada [103] conocida como metodología PASLINK [98] ha mostrado su gran capacidad y versatilidad para la realización de ensayos de caracterización solar térmica de componentes de la edificación en condiciones exteriores reales dinámicas [104]. En su desarrollo participaron hasta once países en una serie de ocho proyectos europeos consecutivos o simultáneos a lo largo de una década [105][106][107]. Desde sus inicios esta metodología fue planteada con carácter de estándar, y por ello se generaron manuales que especifican los requisitos de las instalaciones así como los procedimientos y las técnicas de análisis con que deben ejecutarse sus ensayos [108]. Con este grado de definición, la metodología PASLINK puede ser aplicada independientemente del lugar de instalación, manteniendo altos niveles de calidad en precisión y confiabilidad. Esto quedó demostrado mediante la replicación de un ensayo de intercomparación entre distintos centros europeos equipados con células de ensayo [109][110][111].

La versión inicial de esta célula fue la célula PASSYS [106], en la cual la medición del flujo de calor a través de su envolvente era determinado de forma indirecta a partir de las diferencias de temperaturas superficiales entre el interior y el exterior (Figura 2.1). Para aumentar la precisión y también reducir los tiempos de ensayo, el diseño final PASLINK optó por la medición directa del flujo de calor, recubriendo la totalidad de las superficies interiores de la sala de ensayos con sensores denominados “Heat Flux Sensitive Tiles” (HFS-Tiles) [112]. Se trata de unas placas de aluminio de 53x53x0,3 cm (Figura 2.2 izq.) con un elemento sensor tipo termopila de 10x10x0,3 cm adherido en su cara posterior (Figura 2.2 centro), asociando el flujo de calor que cruza la Tile a la señal en milivoltios producida por el sensor.

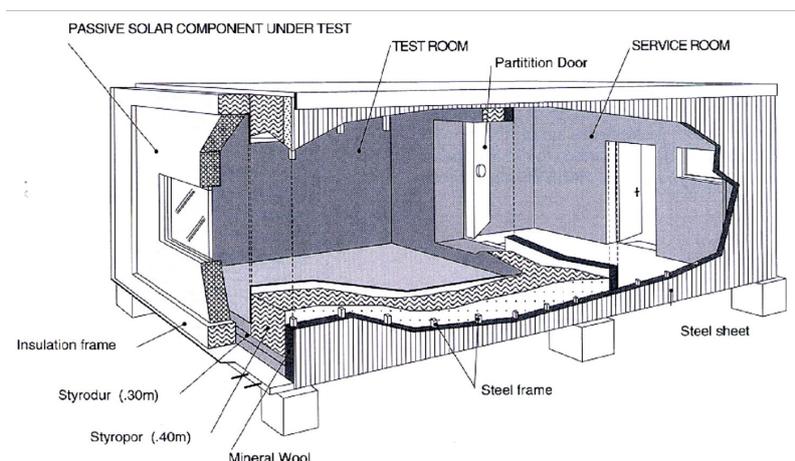


Figura 2.1 – Estructura general de la célula de ensayos PASSYS [105].

A pesar de que una célula PASLINK se construye con un alto nivel de aislamiento térmico en sus paredes, el aumento en la densidad del flujo de calor asociado al efecto de borde cerca de las esquinas es inevitable, significativo, y además ocurre en condiciones dinámicas invalidando su determinación por cálculo estacionario lineal [113].

Las HFS-Tiles permiten cuantificar el efecto de borde con actuaciones como:

- conectar las HFS-Tiles por grupos para diferenciar la medición que proviene del centro de las paredes de la medición hecha cerca del borde. Los grupos de HFS-Tiles que se encuentran en los bordes necesitan corregir su medida por el efecto de borde con un factor denominado precisamente: *factor de efecto de borde* F_c .
- Definir la posición relativa más óptima para el elemento sensor en la cara posterior de la HFS-Tile;
- Fabricar algunas tiles con elementos sensores adicionales denominadas Multi-Tiles (Figura 2.2 derecha) [114]. Los sensores adicionales de una Multi-tile permiten determinar con más precisión el nivel de aumento del flujo de calor por el efecto de borde. Son instaladas por parejas, enfrentadas estratégicamente en esquinas interiores de la célula.

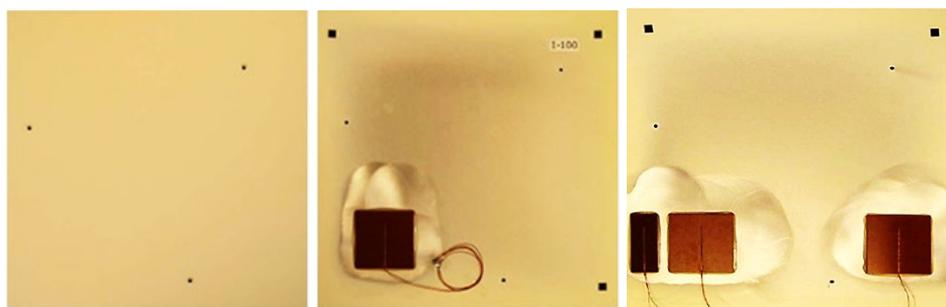


Figura 2.2 – Vista frontal de una HFS-Tile típica (izquierda). Vista posterior de la misma HFS-Tile (centro). Vista posterior de una Multi-Tile.

La célula PASLINK se considera una célula absoluta calibrada. Absoluta en tanto que está concebida para que opere en condiciones de flujo de calor en una sola dirección, del interior hacia el exterior, aportando calor al interior mediante disipación de energía eléctrica por efecto Joule. El calor así suministrado es medido con precisión superior al 99% mediante un vatímetro eléctrico. Por otra parte, se denomina calibrada pues es necesario un factor que corrija el error en medida de las HFS-Tiles que recubren el interior de la célula, debido a causas inevitables como las infiltraciones de aire exterior por muy bajas que sean, la separación entre las propias HFS-Tiles, etc.

Si el elemento a ser caracterizado corresponde a una muestra opaca homogénea, el flujo de calor unidimensional que cruza la muestra puede ser monitorizado con medidores de tal flujo instalados directamente en el centro y otros puntos de la muestra, especialmente los bordes. Por el contrario, si se trata de una muestra semitransparente o muy heterogénea, el flujo de calor es fundamentalmente determinado de manera indirecta por el balance de energía de la célula entera. En estos casos, la precisión con que la célula ha sido calibrada es crucial.

La calibración de una célula de ensayos PASLINK consiste en determinar la razón entre la potencia eléctrica de calefacción disipada en el interior y el flujo de calor que atraviesa las paredes de la sala de ensayos, medido por las HFS-Tiles, en un ensayo denominado precisamente “ensayo de calibración”. Esta razón es llamada el *factor total de calibración de la célula* ' $F_{c,t}$ ', siendo un valor de 1,2 el máximo admisible por la metodología PASLINK, esto es, una diferencia máxima del 20%. El ensayo de calibración tiene por objetivo la determinación de este factor total [115], al tiempo que deben cumplirse ciertos criterios para la señal registrada por las HFS-Tiles, en el sentido que el flujo de calor que cruza cada pared debe estar dentro de

unos límites al ser comparado con las adyacentes, y muy en especial para los grupos de borde. Esto refleja la calidad constructiva de la célula y su buen desempeño.

Una celda correctamente construida e instrumentalizada cumplirá con las limitaciones comentadas, incluso si el valor indicado por los grupos de borde no fuese corregido por ningún factor. Sin embargo, el uso de factores de corrección de borde $F_{c,c}$ es necesario, pues mejora la precisión de la célula. La red PASLINK sugiere técnicas para determinar estos factores usando la señal de las Multi-Tiles, los cuales permanecen constantes para el resto de ensayos, no solo el de calibración. En todo caso, la determinación de los factores de corrección de los grupos de borde depende de la destreza y conocimiento del personal que realiza el ensayo de calibración, por lo que pueden ocurrir arbitrariedades durante el proceso.

C. Escudero (op. citado) propuso en su tesis doctoral que el factor de corrección por efecto de borde fuese una variable determinada dinámicamente a partir de ciertos datos medidos durante la ejecución de cada ensayo. De esta manera pasaba de ser un factor constante determinado en las condiciones del ensayo inicial de calibración para convertirse en un factor dinámico que se adapta a las condiciones de cada ensayo, asegurando que se mantuviese la precisión de medida establecida por el ensayo de calibración. Sin embargo, se observó que su propuesta presentaba cierta carencia, porque se descubrió que no funcionaba igual en todos los tipos de borde presentes en la célula. Este método en esencia se basaba en correlaciones geométricas de las curvas del flujo de calor en los bordes, más específicamente por relaciones entre las pendientes de las rectas de unión de puntos de referencia a lo largo de dicha curva.

El método propuesto en el presente apartado viene a corregir la falta de universalidad del método de relación de pendientes, proponiendo un método que se ha denominado “*de coeficientes de igualación*” que se comprobó, funciona para todos los tipos de borde de la célula. Se trata por tanto de una forma mucho más objetiva, imparcial y realista de determinar los factores de corrección de los factores de borde.

Se tiene así un método que hace un mejor aprovechamiento de la información proporcionada por las lecturas instantáneas de las Multi-tiles. La validez de este método y su impacto de mejora se demuestra a partir del ensayo de calibración de la célula PASLINK denominada Célula EGUZKI [100][99], realizado por el equipo de trabajo del Área Térmica del Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación del Gobierno Vasco (AT-LCCE) en sus instalaciones ubicadas en Vitoria-Gasteiz (Araba).

El ensayo de calibración realizado en su momento obtuvo un valor del 13% para el factor total de calibración de la célula $F_{c,t}$ [102][116]. Dicho ensayo empleó los factores de corrección de borde constantes recomendados por los manuales de ensayo. El método dinámico de coeficientes de igualación redujo este factor a un 6%. Aunque se determina en el contexto de un ensayo PASLINK, el método propuesto es extensible a la corrección de medida de flujo de calor por efectos de borde en general. Constituye por tanto una contribución a aquellos centros de investigación que realizan ensayos en condiciones exteriores en los dos niveles habituales de caracterización [117]–[119]: a nivel de muestras de componentes o a nivel del edificio entero. En el primer caso es una contribución al menos a doce o más centros que realizan su labor investigadora basados en células PASLINK o dispositivos similares [120]–[129]. En el Segundo caso, se trata de instalaciones mucho mayores y más recientes, en condiciones de hacer ensayos a nivel de edificio [130]–[132].

2.2.1. Determinación del factor del efecto de borde a partir de un ensayo de calibración PASLINK

2.2.1.1. Tipos de efecto de borde en una célula PASLINK.

El flujo de calor que cruza la envolvente de una célula PASLINK es medido directamente mediante sendos sensores que recubren la totalidad del interior de la sala de ensayos de esta célula, denominados HFS-Tiles. Estas fueron desarrolladas específicamente para la mejora de las celdas PASSYS por el Instituto TNO de Holanda [114].

La metodología PASLINK establece que el primer ensayo a realizar en la célula sea un ensayo de calibración. Este ensayo permite determinar el grado de incertidumbre entre el flujo medido por las HFS-Tiles y el que realmente cruza la envolvente. Para obtener un mejor resultado se reduce el desbalance entre los flujos de calor de los laterales de la célula y la cara sur cerrando esta cara sur con una pared opaca con la misma configuración constructiva que el resto de la célula. Esta muestra así construida se denomina “muro de calibración” y se recubre igualmente con HFS-Tiles como el resto de paredes de la sala de ensayos.

Las HFS-Tiles del interior de la sala de ensayos de la célula EGUZKI están conectadas en serie, formando grupos que diferencian las zonas centrales de las zonas de borde. Las Multi-tiles se ubican estratégicamente en las esquinas interiores de la célula, para caracterizar los cuatro tipos de borde existentes en la sala de ensayos (Figura 2.3).

Igualmente, las HFS-Tiles ubicadas en el interior del “muro de calibración” están conectadas formando un grupo central y cuatro grupos de borde, y en este elemento se han previsto dos Multi-Tiles para los dos tipos de borde correspondientes (Figura 2.4).

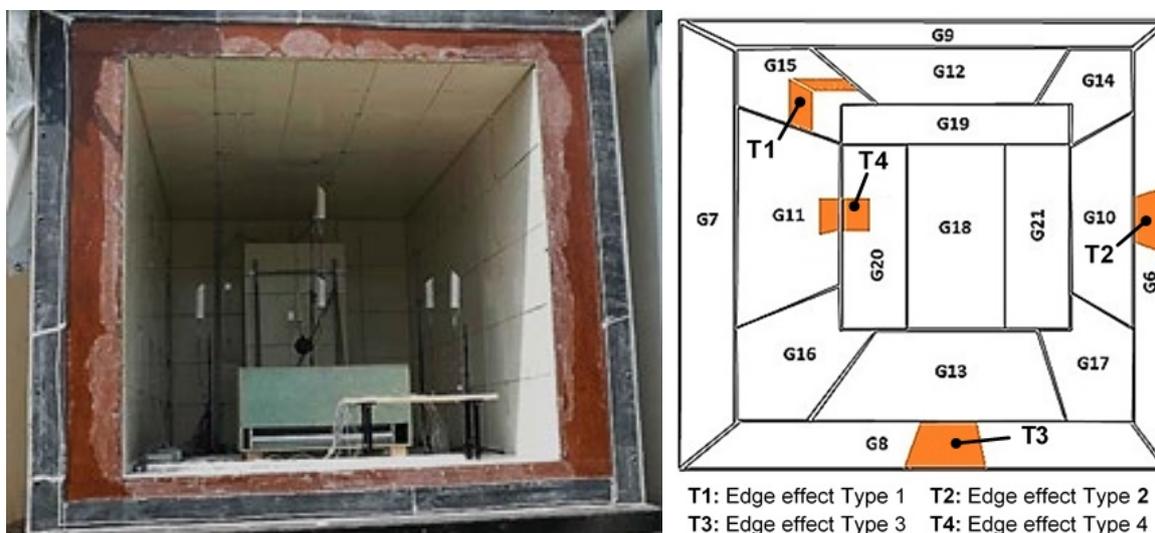


Figura 2.3 – Sala de ensayos de la Célula EGUZKI en el LCCE de Vitoria-Gasteiz y representación de los grupos de HFS-Tiles indicando la posición de las Multi-Tiles.

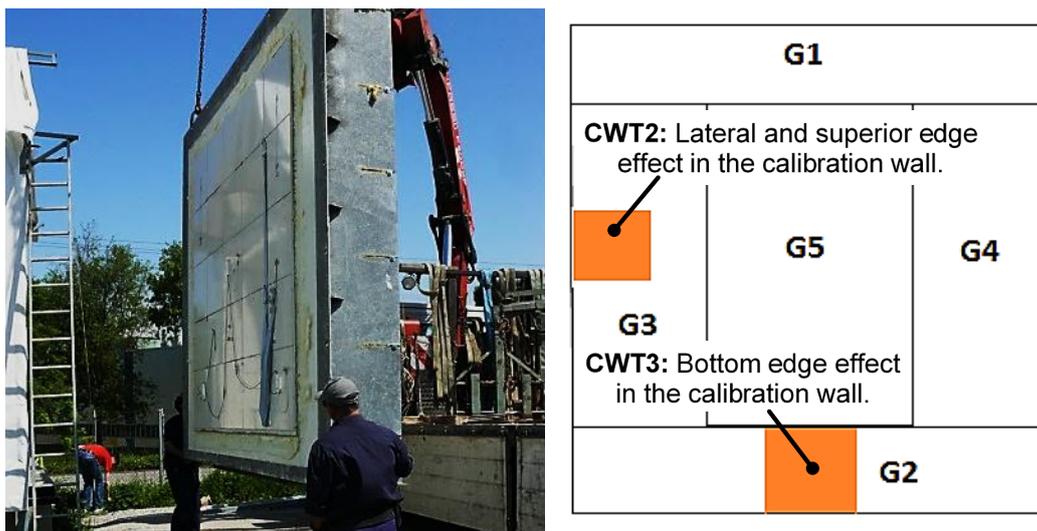


Figura 2.4 – “Muro de Calibración” de la Célula Eguzki en el LCCE de Vitoria-Gasteiz y representación de los grupos de HFS-Tiles indicando la posición de sus dos Multi-Tiles.

2.2.1.2. Tratamiento de los efectos de borde en un ensayo PASLINK.

La sala de ensayos de una celda PASLINK es básicamente un calorímetro, dotado de toda la instrumentación necesaria para la medida directa o indirecta de los flujos de calor presentes durante el ensayo en condiciones exteriores del elemento a caracterizar.

Es relativamente fácil y estable medir el flujo de calor en las zonas centrales de cada una de las paredes de la envolvente de la sala de ensayos a partir de los grupos centrales de HFS-Tiles. En cambio, la cuantificación del efecto de borde cerca de las esquinas de la célula es todo un reto, pues debe conseguirse un nivel de precisión suficiente sin tener que disponer de un importante esfuerzo adicional en instrumentación.

2.2.1.2.1. Estimación del efecto de borde en las primigenias células PASSYS.

Cuando se propuso el diseño de las primeras células de ensayos en exteriores, se esperaba que su alto nivel de aislamiento y el cuidadoso tratamiento de la estructura para anular posibles puentes térmicos, diese como resultado una envolvente con un comportamiento completamente adiabático.

Además, la estimación del puente térmico a partir del concepto de transmisión lineal definido en la norma ISO 10211 [133], reforzaba la expectativa del diseño adiabático pues se obtenían valores muy bajos para los factores de transmitancia lineal. Por ejemplo, para las características constructivas de la célula EGUZKI del presente estudio, el factor obtenido para el puente térmico en las esquinas longitudinales del interior de la célula, entre paredes y techo sería de tan solo $\Psi = 0.024$ (W/m·K).

El coeficiente de transmitancia lineal Ψ permite realizar una estimación del efecto de borde, y es útil para aproximar la potencia de ensayo necesaria. Pero su cálculo es fundamentalmente un prorrateo en condiciones estacionarias y puede presentar un elevado error en la determinación del flujo en la zona de borde en condiciones dinámicas [133][134].

Una vez construidas las primeras células y a medida que se realizaban pruebas experimentales, se detectó que la importancia del efecto de borde era mucho mayor de lo esperado, lo que condujo al desarrollo de propuestas para cuantificar estos efectos como una de las más importantes mejoras al diseño inicial.

2.2.1.2.2. Comprobación de las lecturas obtenidas por los grupos de HFS-Tiles.

Durante la calibración de una célula PASLINK equipada con HFS-Tiles, es esencial comprobar que las lecturas obtenidas por los grupos de estas, en especial los de borde, sean admisibles.

Las lecturas pueden verificarse mediante la comparación de la ratio $Q_{hfs-edge}(i)/A(i)$ obtenida para un grupo dado (i) de HFS-Tiles en un borde, con una correspondiente ratio $Q_{hfs-central}(j)/A(j)$ producida por un grupo (j) de HFS-Tiles en el centro de pared y adyacente al primero. La razón de estas dos ratios debe estar dentro de un intervalo de 1.2 ± 0.1 para el caso de bordes longitudinales (Tipología 1), y 1.5 ± 0.2 para el caso de los bordes del extremo sur (Tipologías 2 y 3) [112]. Para la pared norte de la sala de ensayos (Tipología 4), que corresponde a la pared que separa la sala de ensayos de la sala de servicio, la metodología PASLINK permite ignorar el efecto de borde en esta pared, es decir, $F_c = 1$. La sala de servicio es calefactada para que se mantenga en condiciones de confort, por lo que tiene menor efecto sobre la sala de servicio que el exterior. Sin embargo, esta omisión de corrección no implica el dejar de comprobar las diferencias de esta pared respecto a sus adyacentes. La comprobación de que el comportamiento relativo entre paredes encaja dentro de los parámetros establecidos, se convierte en un indicador de que la celda PASLINK ha tenido un ensamblaje correcto, así como un sistema de medida funcional. Tal célula está en condiciones de obtener un adecuado factor de calibración total F_{c_t} que como se ha mencionado, ha de estar en el intervalo de 1 a 1,2.

Si la célula está equipada con Multi-Tiles, sus respectivos sensores A , B y C pueden usarse para analizar el gradiente de flujo de calor en el borde, e incluso para determinar el factor de borde F_c usando correlaciones entre el flujo medido en el borde y el medido en la zona central. Por ejemplo, la guía de instalación de las HFS-Tiles [114], sugiere la correlación obtenida por Rohsenow [135] para caracterizar una esquina bidimensional simétrica. Otra técnica disponible es la aproximación lineal del efecto de borde, la cual se explica seguidamente. Sin embargo y tal y como se ha dicho previamente, incluso teniendo a disposición estos recursos de aproximación para la cuantificación de los efectos de borde, el conocimiento, destreza y criterio del técnico a cargo de la calibración interviene en el resultado final.

2.2.1.2.3. Aproximación lineal del efecto de borde a partir de las lecturas de los sensores de las Multi-Tiles.

A continuación, se describe una técnica que aprovecha las lecturas de los tres sensores que posee una Multi-tile para aproximar la curva de variación de flujo de calor en el borde a una curva de tramos lineales. Esta técnica es importante para el desarrollo del método de coeficientes de igualación propuesto para la mejora del equipo de ensayo empleado en la parte experimental de esta Tesis.

La densidad del flujo de calor unidimensional en el centro de las paredes corresponde directamente a la medida detectada por las HFS Tiles. Por el contrario, cerca de las esquinas la

densidad del flujo de calor tiene un comportamiento asintótico, que como se aprecia en la Figura 2.5 en tan solo unos milímetros puede duplicar el valor unidimensional de la zona central.

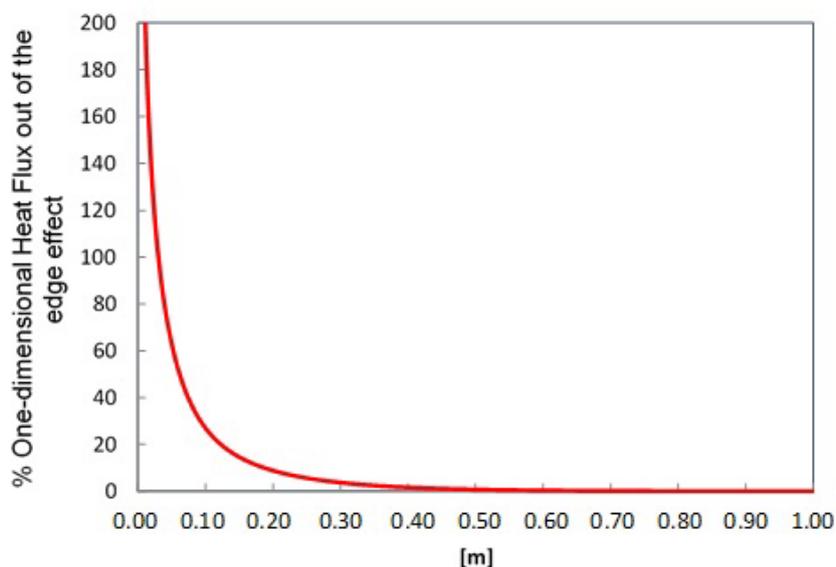


Figura 2.5 – Variación típica de densidad de flujo de calor transferido en la superficie interior por el efecto de borde, expresado como porcentaje respecto al flujo central unidimensional.

Precisamente el objetivo de las Multi-tiles es el de poder establecer dicho perfil de flujo durante el ensayo, al menos en tres de sus puntos, como se muestra en la Figura 2.6. La posición del sensor B resulta estratégica pues ha sido definida para que sirviese como una primera aproximación del flujo de calor total transferido en el borde. Esta aproximación ha sido deducida de la siguiente manera: teniendo en cuenta que el área cubierta por el grupo de HFS-Tiles destinados al borde de la célula cubre una longitud L , medida desde el vértice de esquina, el valor de flujo de calor q_B debe ser tal que el área del rectángulo $q_B \cdot L$ sea equiparable al área bajo el perfil real del flujo de calor, la cual corresponde a la totalidad de calor transferido en el borde.

De hecho, todas las HFS-tiles tienen su elemento sensor ubicado en la posición B (a 12 cm del borde de la Tile) y así no era necesario preparar lotes separados para el borde y para la zona central.

Sin embargo, es necesario corregir la medida del calor total en el borde a partir de la lectura del sensor B empleando el factor de corrección, F_c , definido según la ecuación (2.1) que corresponde a la relación entre las dos áreas comentadas.

$$F_c = \frac{\int_0^L q(x) \cdot dx / L}{q_B} \quad (2.1)$$

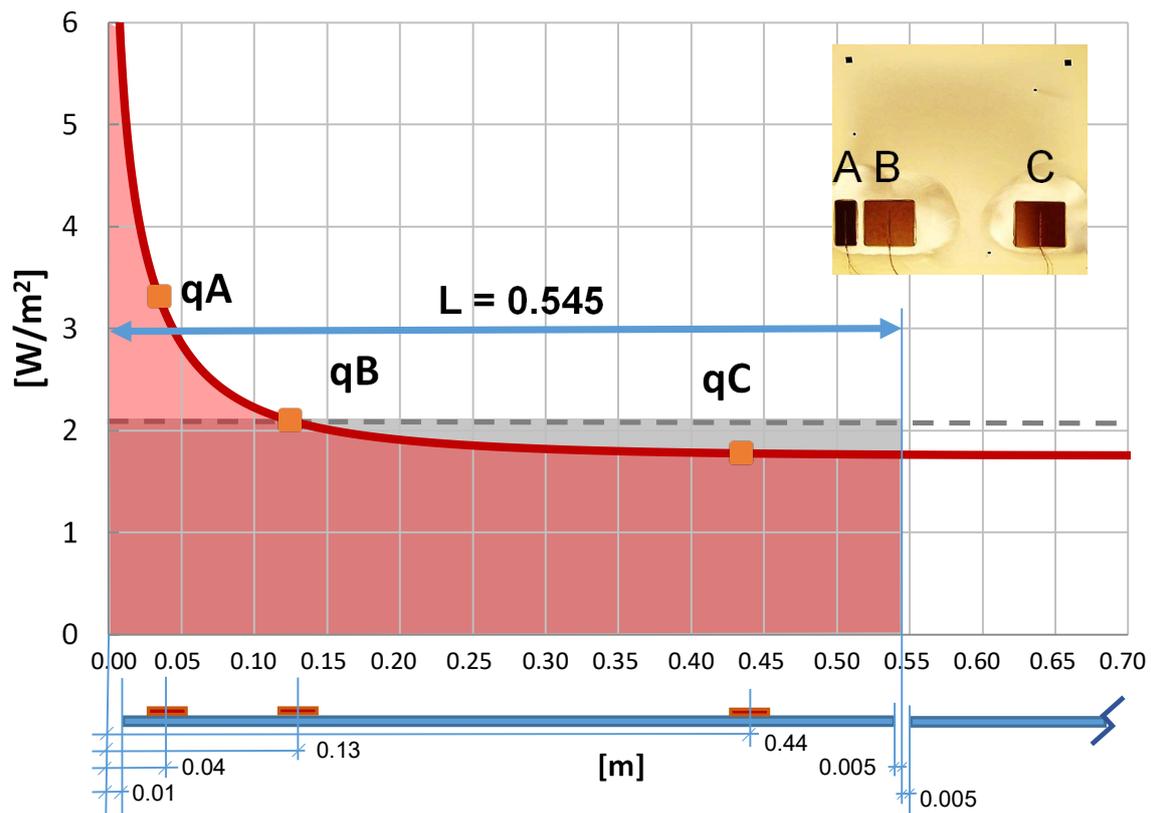


Figura 2.6 – Sensores A (3 cm), B (12 cm), C (43 cm) de una Multi-Tile y perfil del flujo de calor en el borde.

Los tres sensores de la Multi-Tile permiten obtener una aproximación lineal de la función $q(x)$ y por tanto del valor de la integral en la indicada ecuación (2.1).

Para ilustrar el procedimiento de aproximación lineal, se toma como ejemplo el encuentro entre cubierta y paredes verticales, que corresponde a la tipología de borde T1.

La linealización del área bajo la curva del flujo de calor en el borde permite determinar de forma aproximada esta área. Dicha área resulta de la suma de las áreas poligonales (tres triángulos y tres rectángulos) que resultan de la unión mediante líneas rectas de los valores q_0 , q_A , q_B y q_C , representados en la Figura 2.7, obteniéndose la relación expresada por la ecuación (2.2).

Los valores de flujo q_A , q_B y q_C se miden directamente mediante los correspondientes sensores de la Multi-Tile, quedando por determinar el valor del flujo en el borde, q_0 .

El valor de q_0 puede estimarse por aproximación. Un ejemplo es la aproximación $q_0 = 6 \cdot q_C$ [114] de aplicación en el borde entre las paredes verticales este y oeste con la cara sur. Se trata de una aproximación establecida por el equipo desarrollador de las HFS-Tiles, basados en sus estudios con elementos finitos durante la etapa de diseño. Esa aproximación es considerada “una primera estimación orientativa” para una célula PASLINK ya que dichos estudios con elementos finitos de los que fue obtenida se basaron en la composición típica de pared de la misma. Sin embargo, es posible tener estimaciones más precisas del valor q_0 si se conoce con detalle la composición de la pared de la célula o equipo similar y se hace el correspondiente estudio con elementos finitos para el borde en cuestión.

La linealización producirá mejores resultados cuanto más correcta sea la estimación del valor $q\theta$. A su vez, esto redundará en una mejor estimación del factor de corrección F_c que actúa sobre la lectura del valor qB . El método de coeficientes de igualación propuesto más adelante se basa en el estudio de elementos finitos desarrollado por C. Escudero para la determinación del valor $q\theta$ durante la calibración de la célula EGUZKI. Debe notarse que esta simulación con elementos finitos es un recurso empleado tan solo una vez junto con el ensayo de calibración inicial.

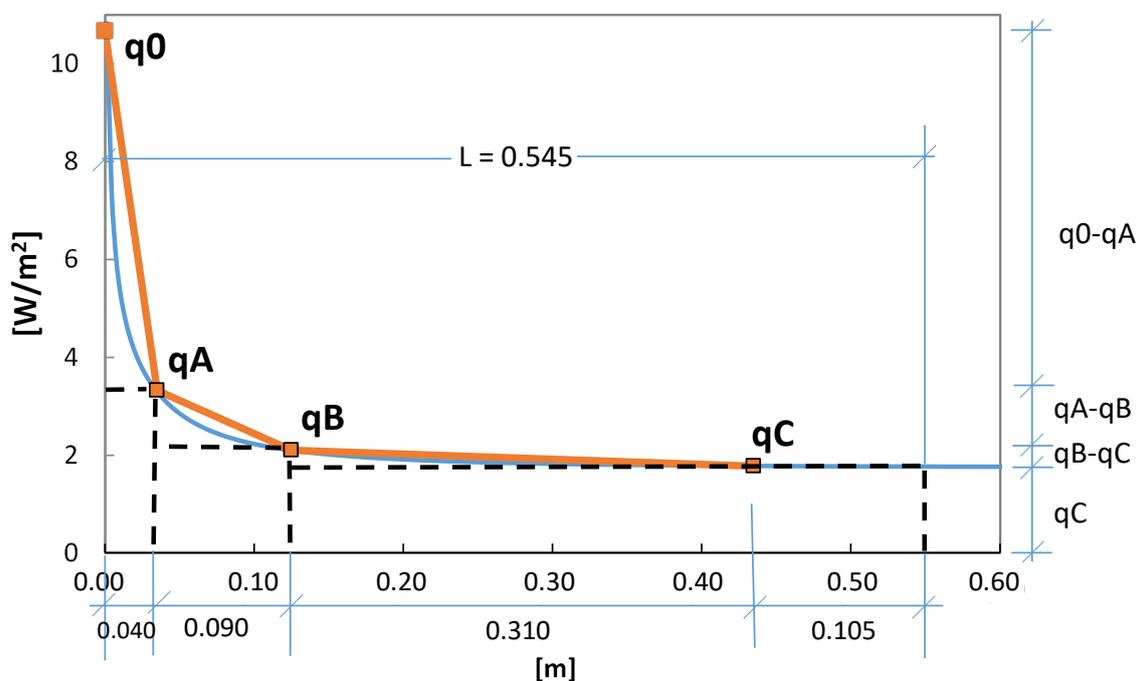


Figura 2.7 – Aproximación lineal del flujo de borde en el encuentro entre cubierta y paredes, tipología de borde T1.

$$\frac{\int_0^L q(x) \cdot dx}{L} \cong \frac{40q_0 + 130q_A + 400q_B + 520q_C}{2 \cdot (10 + 530 + 5)} \quad (2.2)$$

2.2.1.3. Procedimiento del ensayo de Calibración PASLINK.

El proceso de calibración consiste en inyectar una señal de potencia eléctrica calefactora en la sala de ensayos, en una cantidad conocida con exactitud pues es medida con un vatímetro, y compararla con la energía medida a través de la envolvente por las HFS-Tiles. Como se ha comentado, para maximizar la precisión del ensayo de calibración se utiliza como muestra en la cara sur, un “muro de calibración” con un valor de transmitancia semejante a la envolvente de la celda, de forma que el flujo en cada superficie se reparta lo más homogéneamente posible.

Las principales fuentes de incertidumbre en la medida del calor que cruza la envolvente de la sala de ensayo son tres: la superficie no cubierta por las HFS-Tiles, el efecto de borde y el calor transferido por las infiltraciones de aire al interior de la celda PASLINK.

Todas ellas quedan intrínsecamente consideradas por el factor de corrección total de la célula. No se puede hacer mucho con la pequeña área de separación entre HFS-Tiles no cubierta por las mismas y por tanto no monitorizada para el paso de calor. En cambio para las infiltraciones de aire se establece que sean las mínimas posibles, mientras que para el efecto de borde se recurre a la definición del correspondiente factor de corrección de efecto de borde F_c .

Las infiltraciones de aire son difíciles de medir en tiempo real durante la ejecución del ensayo, y por tanto se garantiza su baja participación en los mecanismos de transferencia de energía de la célula, midiendo el nivel de infiltración antes y después de cada ensayo. La metodología PASLINK establece que el valor de renovaciones en la sala de ensayos debe ser inferior a $0,5 \text{ h}^{-1}$, a una diferencia de presión de 50 Pa. De esta manera se asegura que nivel de calor intercambiado por infiltración esté por debajo de la incertidumbre de medida de la potencia intercambiada por la célula.

En la Figura 2.8, se grafican los datos experimentales de las pruebas de presión antes y después del ensayo de calibración de la celda EGUZKI. A partir de esta gráfica, se determina que para una diferencia de presión interior-externa de 50 Pa, las infiltraciones en la sala de ensayos son $n_{tr} = 0.11 \pm 0.01 \text{ h}^{-1}$ (Caudal de infiltración volumétrico normal = $3.82 \pm 0.43 \text{ Nm}^3/\text{h}$) antes del ensayo de calibración; y $n_{tr} = 0.16 \pm 0.02 \text{ h}^{-1}$ (Caudal de infiltración volumétrico normal = $5.90 \pm 0.85 \text{ Nm}^3/\text{h}$) after.

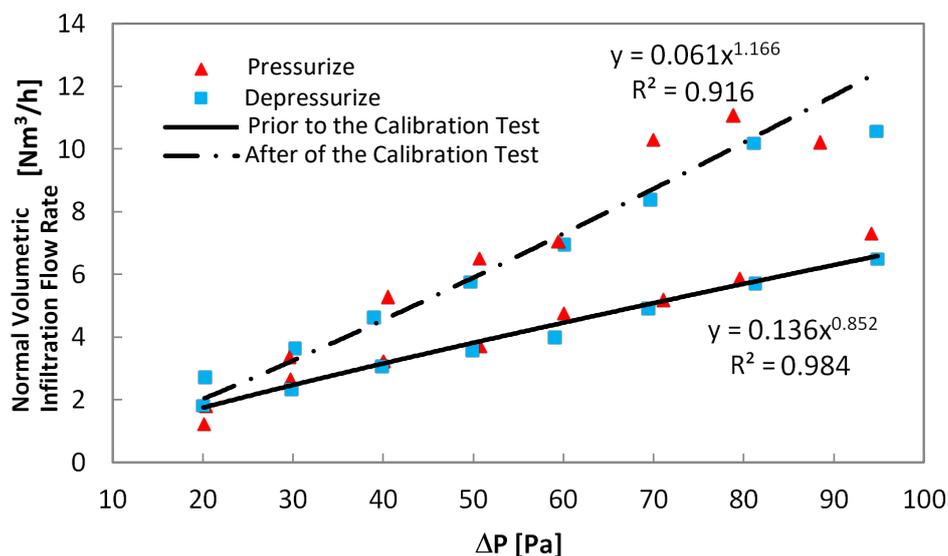


Figura 2.8 – Medida del caudal de aire de infiltración antes y después del ensayo de calibración.

2.2.1.3.1. Secuencias para la disipación de potencia dentro de la célula en ensayo

Los procedimientos de ensayo buscan desacoplar y por tanto diferenciar la respuesta térmica dinámica de la celda y de la muestra en ensayo. Para ello se hacen excitaciones térmicas dinámicas del interior de la célula mediante una disipación variable de potencia eléctrica en forma de calor. Las variaciones ocurren tanto en intensidad como en frecuencia de tiempo de disipación, en series de alto y bajo valor. Esta estrategia permite una exitosa identificación de los parámetros térmicos característicos de la muestra ensayada, tanto los determinados

habitualmente en condiciones de estado-estacionario (p.ej., el coeficiente de transmitancia térmica *UA-value* y el factor de ganancia solar total *gA-value*) como los que solo es posible determinar en condiciones dinámicas (p.ej., capacidad térmica) [98].

La estrategia de ensayo debe evitar posibles correlaciones entre variables que sean de interés para ser usadas como entradas en la siguiente fase del ensayo PASLINK, que es la fase de modelamiento a través del análisis de identificación de parámetros. Un ejemplo muy claro es la correlación existente entre la diferencia de temperaturas de aire entre el interior y el exterior y la radiación solar. Si estas variables son empleadas como entradas del modelo del proceso de calibración, pero en el proceso de ensayo no han sido desacopladas, sería difícil determinar cuando la transferencia de calor es el resultado de un fenómeno de conducción/convección o cuando de un fenómeno de radiación solar. Por tanto, la potencia calefactora disipada en el interior debe ser la suficiente para conseguir y mantener una diferencia de temperatura en torno a 20 °C entre el interior y el exterior de la sala de ensayos. Esta condición permite obtener la suficiente proporción señal-a-ruido como para medir con claridad y precisión las diferencias de temperatura y de flujo de calor a través de la muestra. La referencia anteriormente citada de Baker & van Dijk [98] proporciona una descripción detallada de la estrategia de control para el ensayo y su posterior modelización por identificación. Este método de operar la célula durante un ensayo PASLINK minimiza la duración del mismo, requiriendo tan solo entre 250 y 400 horas. En los primeros ensayos PASSYS los ensayos requerían meses de duración.

La excitación térmica de la célula se hace de forma dinámica alternando periodos de conexión y de desconexión de la resistencia eléctrica calefactora de la sala de ensayos. Estos periodos de conexión/desconexión se hacen siguiendo fundamentalmente dos tipos de secuencias temporales denominadas PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) y ROLBS (Randomly Ordered Logarithmically distributed Binary Sequence)[108]. Ambas secuencias comienzan con un periodo de inicialización en el que no se aplica potencia calefactora y por tanto la temperatura de ensayo evoluciona libremente. En el caso de la secuencia PRBS, el intervalo mínimo de conexión o desconexión es de 2 h, y en el caso de la secuencia ROLBS es de 0,5 h.

La Figura 2.9 muestra el perfil típico de las secuencias PRBS y ROLBS. Se puede apreciar que hay una potencia base de 50 W, correspondiente al ventilador de agitación continua del aire interior que busca mantener homogenizadas las temperaturas interiores.

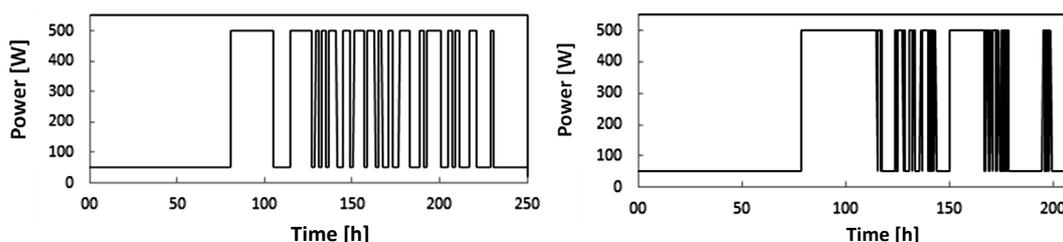


Figura 2.9 – Secuencia ROLBS (izquierda), y secuencia PRBS (derecha).

El ensayo de calibración realizado en la célula EGUZKI comprendió dos periodos. Un primer periodo de 400 horas estuvo formado por una secuencia PRBS de 225 horas, seguida de una secuencia ROLBS de 175 horas. El segundo periodo correspondió a un pulso de calentamiento de 300 horas, con un calentamiento sostenido durante las 100 horas centrales. En

todas las rutinas la potencia inyectada fue de 250W, suficiente para conseguir unas diferencias de temperatura interior-exterio de 20 K. En la Figura 2.10 se aprecia la evolución de las tres rutinas empleadas en el ensayo de calibración de la célula EGUZKI, mientras que la Figura 2.11 muestra un detalle del periodo de alta frecuencia de la secuencia PRBS.

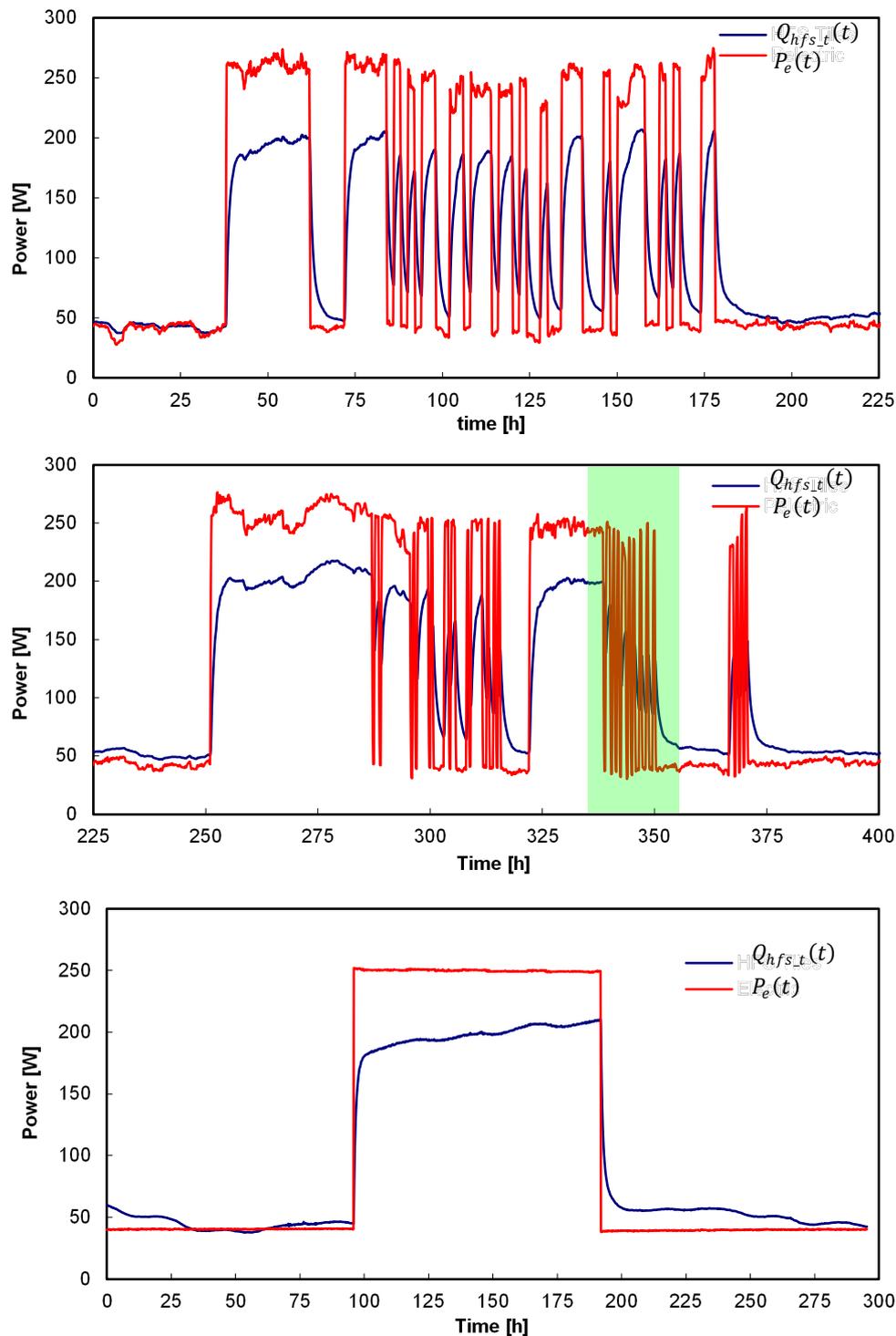


Figura 2.10 – Potencia eléctrica de calentamiento y correspondiente medida del flujo de las HFS Tiles para las rutinas PRBS, ROLBS y PULSO, de arriba abajo respectivamente.

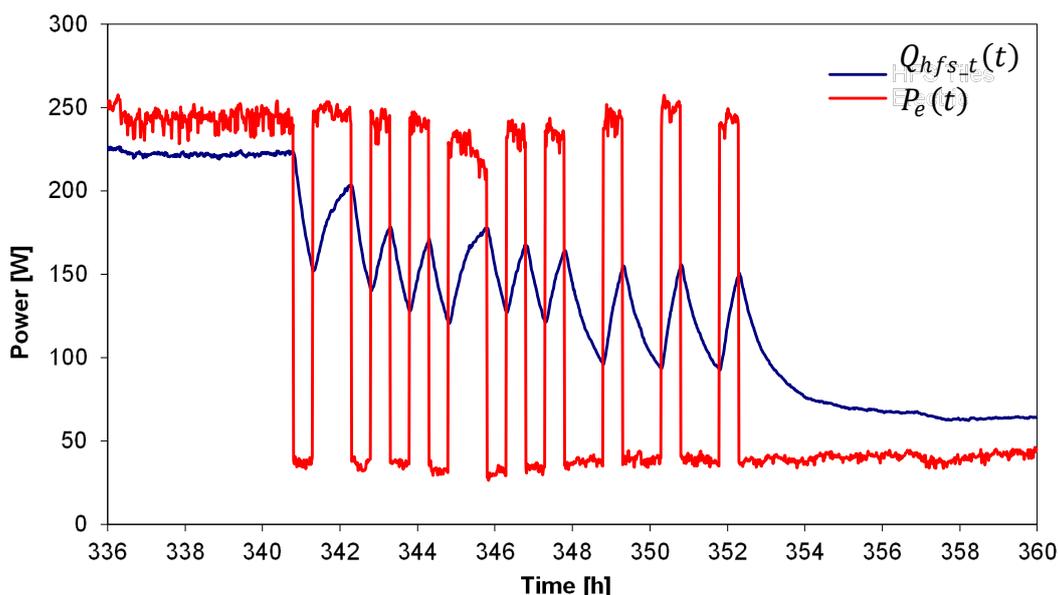


Figura 2.11 – Respuesta de las HFS tiles en un intervalo de alta frecuencia de excitación durante el periodo *ROLBS*.

Al obtener el factor de calibración de la célula mediante vías diferentes de excitación de la célula, se asegura que la incertidumbre de medida del flujo de calor especificada para la célula es representativa de todas las condiciones dinámicas posibles para los futuros ensayos. Así, el factor de calibración total declarado para la célula durante su calibración corresponde al promedio del obtenido en las diferentes secuencias de excitación térmica. Resulta entonces necesario tener un criterio para identificar los instantes de inicio y de final del ensayo de calibración asociado a cada excitación térmica, así como el tiempo de descanso de la célula entre estos.

Los periodos de inicialización y relajación, antes y después de la excitación térmica de la célula, deben ser lo suficientemente largos como para asegurar que la totalidad de la energía eléctrica entregada por las secuencias de excitación ha cruzado la superficie interior cubierta por las HFS-Tiles, o que por lo menos se está tomando como referencia un periodo en el que la energía transferida al exterior a través de la superficie de las HFS-Tiles compensa la inyectada al interior. Un indicador de tal condición, es que la temperatura de aire interior registre el mismo valor antes y después de la excitación. Como ejemplo se muestra la evolución de temperatura interior durante la excitación pulso en la Figura 2.12. En esta figura se indica el intervalo de tiempo que debe tomarse como referencia para esta excitación, esto es, cuando la temperatura interior registra el mismo valor antes y después de la excitación.

Debe notarse que, debido al alto nivel de aislamiento de la envolvente de la célula, la temperatura de aire interior y la superficial de las HFS-Tiles se mantienen muy próximas y solidarias durante el ensayo. Por ello esta temperatura de aire es tan válida como la de superficie de las HFS-Tiles para detectar estos periodos de compensación entre energía inyectada y transferida.

Con el intervalo de duración del ensayo delimitado según el criterio anterior, puede asegurarse que sea correcto el valor obtenido para el factor de calibración total de la célula ' F_{c_t} ' de acuerdo a la definición que se expone en el subapartado siguiente.

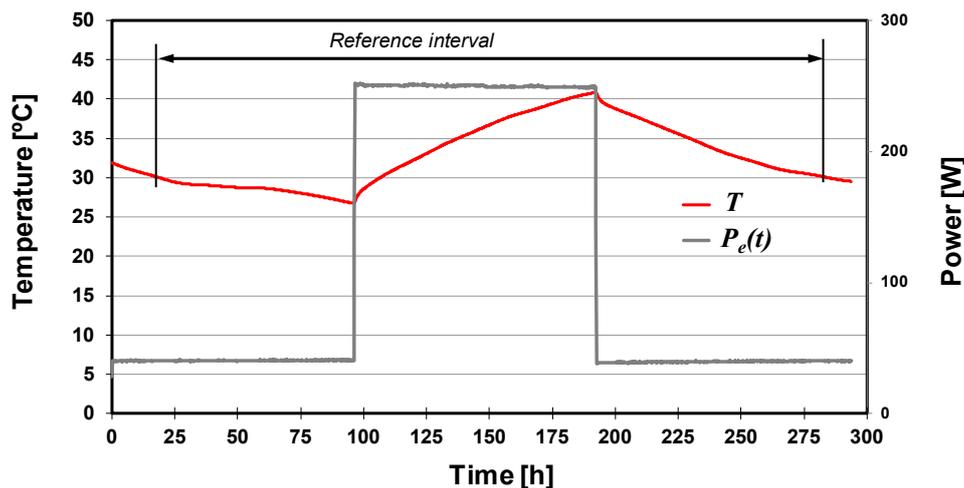


Figura 2.12 – Indicación del periodo de tiempo que representa la excitación térmica de la secuencia PULSO.

2.2.1.3.2. Factor de calibración total para la célula PASLINK

El principal resultado del ensayo de calibración es el factor de calibración total de la celda ' F_{c-t} ' y es determinado mediante la expresión que se indica en la ecuación (2.3). Este factor representa la proporción durante el periodo de ensayo entre la energía total entregada por la potencia eléctrica calefactora disipada al interior de la célula, $P_e(t)$, y la energía total transferida en forma de calor a través de las HFS-Tiles ' $Q_{hfs-t}(t)$ '. Como se aprecia, estos valores totales se determinan mediante integración en el tiempo de sus correspondientes valores instantáneos, desde el inicio del ensayo en el tiempo t_i , hasta la finalización en el tiempo t_f .

$$F_{c-t} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} P_e(t) dt}{\int_{t_i}^{t_f} Q_{hfs-t}(t) dt} \quad (2.3)$$

A priori este factor debe ser superior a la unidad ya que la superficie cubierta por las HFS-Tiles es 2,5% menor a la total del interior de la sala de ensayos debido a la separación entre las HFS Tiles (esta separación es de 1 cm en promedio). Igualmente, este factor incluye el efecto asociado a las infiltraciones y a los efectos de borde. En una instalación correctamente ejecutada este valor debe estar comprendido entre $1 < F_{c-t} < 1,2$, pues la metodología PASLINK considera inadmisibles una diferencia superior al 20%.

El flujo de calor total medido por las HFS-Tiles, Q_{hfs-t} , es el resultado de sumar lo medido por todos los grupos. Cada grupo tiene un número determinado de HFS-Tiles que cubre un área dentro de la célula en la que se incluye la separación entre Tiles. La señal en voltaje DC generada por las HFS-Tiles requiere un factor conversión establecido en $\epsilon_{ref} = 31.5 \pm 1.7 \mu V/(W/m^2)$ a 20 °C, con una dependencia respecto a la temperatura de 0.14%/K. Este factor de conversión se recalibra con una periodicidad de 2 años. Como se ha mencionado, la medida de los grupos de las HFS-Tiles centrales no necesita corrección, mientras que en los grupos de los bordes se aplica el correspondiente factor de corrección por efecto de borde F_c .

Como se ha indicado, el factor de calibración total f_{c-t} de la célula EGUZKI es el valor promedio del factor obtenido para cada una de las tres rutinas de excitación térmica aplicadas.

2.2.2. Método propuesto para la determinación del factor de efecto de borde.

2.2.2.1. Hipótesis

Tal y como se explicó en 2.2.1.2.3, la aproximación lineal del flujo de calor cerca del borde (ver anterior Figura 2.7), usando las lecturas de las Multi-Tiles (ecuación (2.2)), será más precisa en función de la certidumbre con se determine el valor $q\theta$. Un recurso para determinar $q\theta$ es la simulación del flujo de calor transferido en el borde de la célula, usando software basado en métodos de volúmenes finitos. Este valor $q\theta$ depende de la geometría del borde y las condiciones dinámicas en temperaturas. Cuando se define el modelo numérico geométrica y físicamente, se está teniendo en cuenta de manera implícita la geometría del borde analizado. En cuanto a las condiciones térmicas dinámicas, es posible tenerlas en cuenta haciendo que la simulación sea igualmente dinámica. Para ello, se usan como entradas de la simulación los valores de temperatura interior y exterior registrados en las condiciones reales del ensayo. Así, los resultados del modelo numérico pueden ser validados por comparación entre las temperaturas y los flujos de calor superficiales obtenidos por simulación con los registrados en el ensayo.

El paso siguiente es la determinación de los factores A' , B' y C' de la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** usando técnicas de iteración numérica. Los valores de $q\theta$, qA , qB y qC corresponden a los valores medios para el periodo simulado. El miembro izquierdo de esta ecuación proviene de la aproximación lineal (ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), mientras que el miembro derecho es un polinomio de grado cero que permite determinar el flujo de calor en el borde mediante una aproximación que prescinde del término $q\theta$. Obtener el valor de los coeficientes del miembro derecho es el objetivo principal de este método y esta es la razón por la cual se denomina “método de coeficientes de igualación”, dado que estos coeficientes son los que consiguen que se cumpla la igualdad en la ecuación (2.4).

$$40q\theta + 130qA + 400qB + 520qC = A' \cdot qA + B' \cdot qB + C' \cdot qC \quad (2.4)$$

Finalmente, la determinación del factor de corrección, F_c , se hace substituyendo las lecturas de las Multi-Tiles para qA , qB y qC , en la ecuación (2.5), para cada intervalo de medida.

$$F_c = \frac{\int_0^L q(x) \cdot dx/L}{qB} \cong \frac{A' \cdot qA + B' \cdot qB + C' \cdot qC}{2 \cdot (10 + 530 + 5) \cdot qB} \quad (2.5)$$

Así queda expuesta la hipótesis base del método propuesto para la determinación de los factores de corrección de los efectos de borde, F_c . Para demostrar su validez se toma como ejemplo el borde de tipo T1, el correspondiente al encuentro longitudinal entre las paredes

laterales de la célula y el techo. Seguidamente a esta demostración se reportan los valores obtenidos para los coeficientes de igualación A' , B' y C' del resto de tipos de borde.

2.2.2.2. Validación del método propuesto. Ejemplo para el borde de tipo T1.

Como primer paso, se simuló el borde longitudinal correspondiente al tipo T1 entre la pared lateral y el techo de la célula. El software empleado fue Fluent v6.2. La Tabla 2.1 resume las características del modelo de simulación definido.

Tabla 2.1 – Propiedades y parámetros del modelo del puente térmico para analizar el efecto de borde en el encuentro entre pared lateral y techo.

Mesh	Elements	130445		Parameters	ΔT	20	K	Results	q	3.64	W/m	
	Size	3 mm			U_{wall}	0.070	W/m ² K		L^{2D}	0.182	W/mK	
	EquiAngleSkew	0 - 0.1	99.61%		U_{roof}	0.088	W/m ² K		Ψ	0.024	W/mK	
	Aspect Ratio	1 - 1.1	98.07%		l_{wall}	1	m					
					l_{roof}	1	m					

Para un salto térmico de 20 K el modelo simulado produce el campo de temperaturas de la Figura 2.13. También se incluyen las correspondientes curvas de variación de densidad del flujo de calor en función de la distancia respecto a la esquina interior.

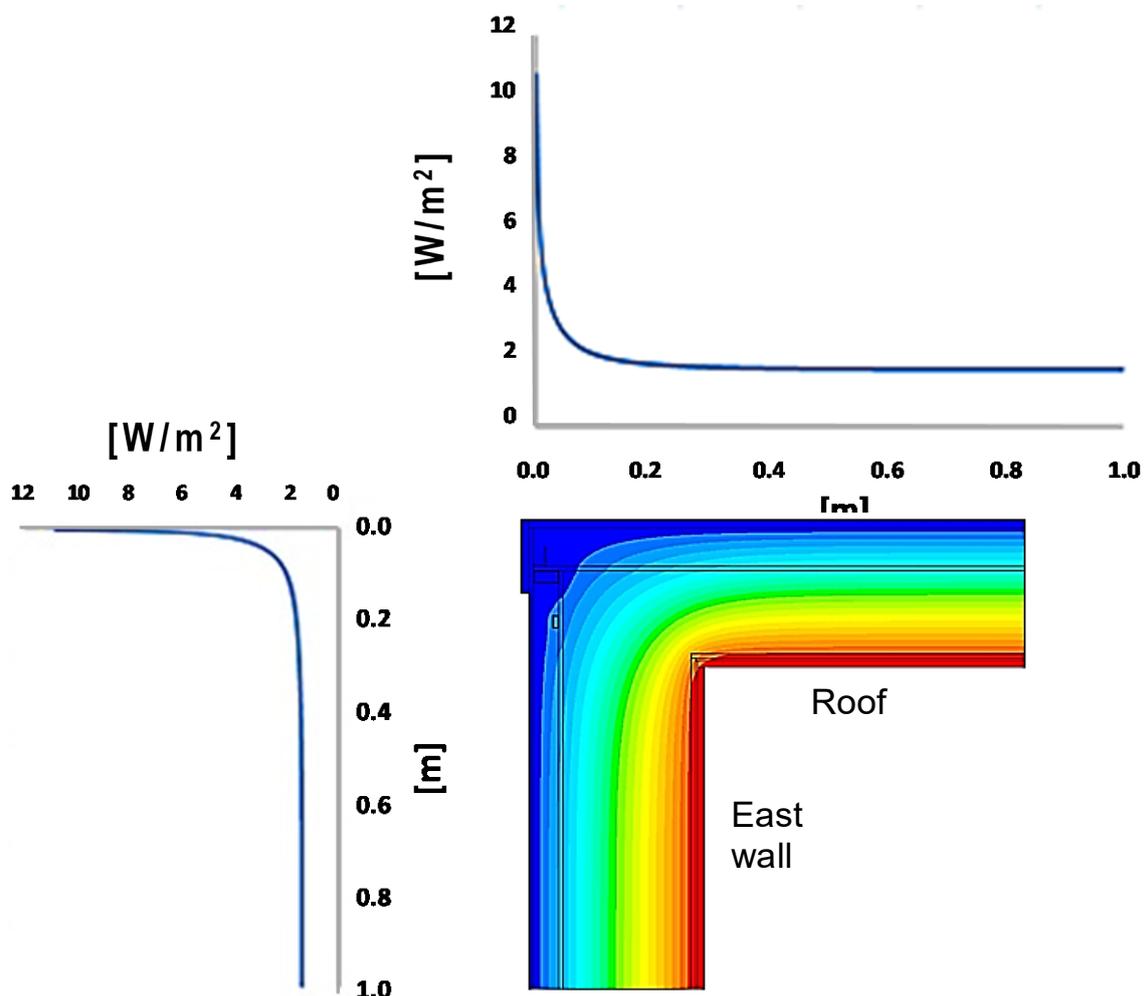


Figura 2.13 – Campo de temperaturas en la sección del encuentro entre cubierta y pared lateral, y perfiles de la variación del flujo de calor en las superficies interiores.

Así mismo, los valores de temperatura ambiente externa e interna, medidas durante la secuencia ROLBS del ensayo de calibración, son usadas como variables de entrada para la simulación dinámica. En la **Figura 2.14** se aprecia la evolución de estas dos variables.

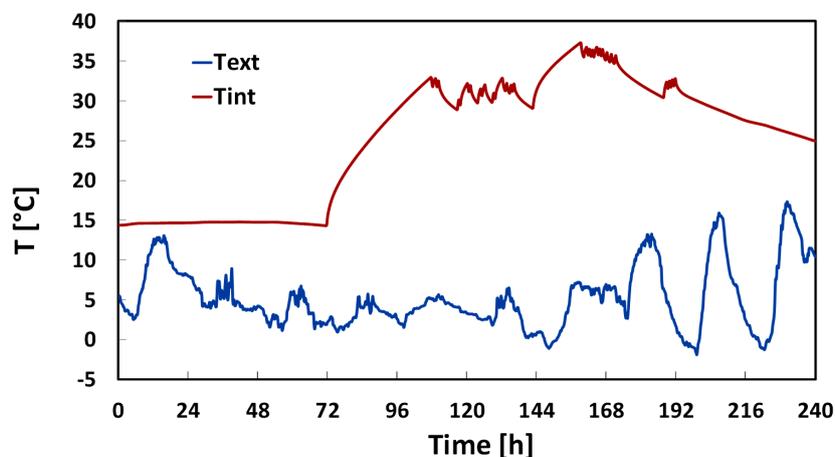


Figura 2.14 – Temperatura interior y exterior grabada por la célula, aplicada al modelo numérico del efecto de borde de Tipo 1.

El modelo de simulación dinámica en la zona alejada del efecto de borde, produce la variación de flujo de calor mostrado en la Figura 2.15. Se muestra el flujo obtenido tanto en la pared lateral como en la cubierta. Nótese como los dos flujos son muy cercanos, lo que permite afirmar que tanto la pared lateral como la cubierta producen la misma respuesta térmica. Por este motivo la metodología PASLINK considera los encuentros de las paredes laterales con la cubierta, y con el suelo, como una misma tipología de borde, a los que se les puede aplicar el mismo factor de corrección.

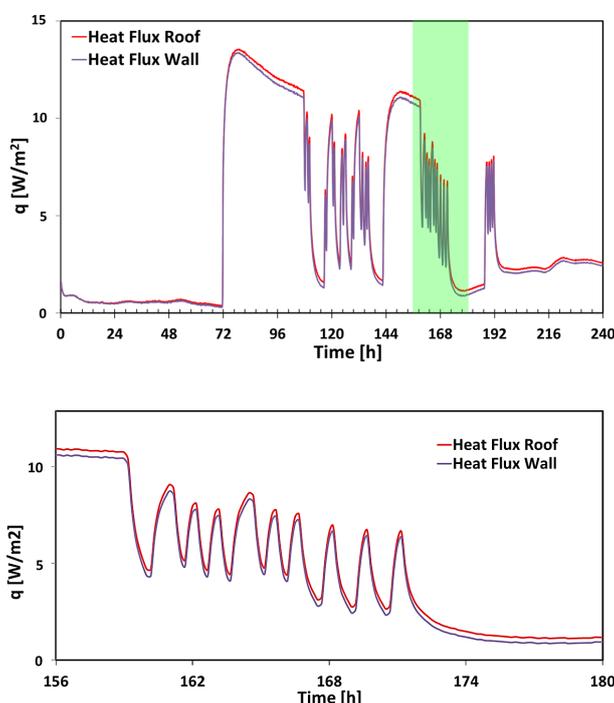


Figura 2.15 – Flujos unidimensionales obtenidos mediante el modelo numérico en la zona alejada del efecto de borde de Tipo 1. La figura inferior es una ampliación del intervalo sombreado.

De todo el periodo simulado, el análisis se centra en una parte con excitación térmica de alta frecuencia en la que el modelo está sometido a una gran variabilidad, entre la hora 156 y la hora 180 (gráfico inferior de la Figura 2.15). Se extrae el perfil de temperatura en el borde para cinco instantes diferentes: 156, 162, 168, 174 y 180 horas. Corresponden a instantes antes, durante y después de la excitación térmica.

Los perfiles obtenidos para los instantes mencionados se muestran en la Figura 2.16. Se verifica que hay un mayor gradiente cerca del borde en los momentos de mayor potencia calefactora, así como la correspondencia de q_C con el flujo unidimensional lejos del borde.

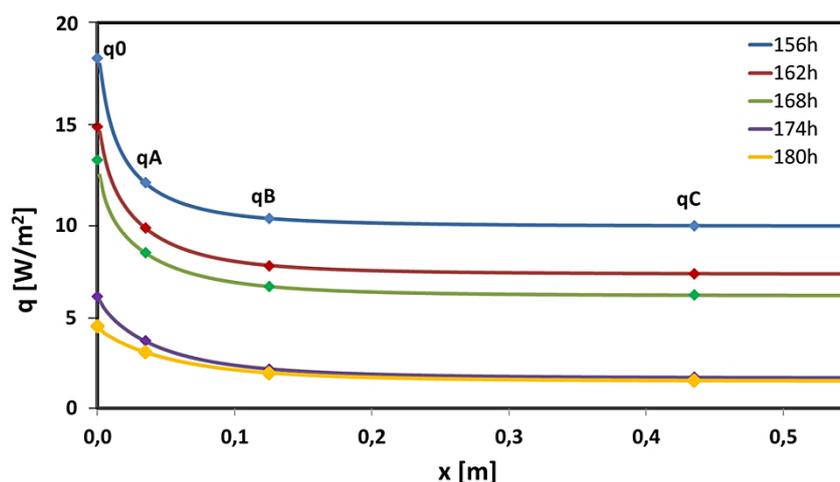


Figura 2.16 – Variación del perfil del flujo de calor para el efecto de borde Tipo 1. Valores obtenidos para distintos momentos de la simulación del ensayo.

En segundo paso, debe evaluarse la diferencia entre los datos experimentales y los correspondientes obtenidos por la simulación. La máxima diferencia encontrada fue del 15%, por lo que la simulación fue considerada válida.

El tercer paso corresponde a la determinación de los coeficientes de igualación A' , B' y C' . En el ejemplo dado, la resolución de la ecuación (2.4) por iteración, produce los siguientes valores: $A'=290,20$; $B'=368,13$ y $C'=609,18$.

La Figura 2.17 muestra los ajustes de la señal de las HFS-Tiles para los ensayos de calibración en los casos de las secuencias PULSO y ROLBS, aplicando los factores dinámicos para la corrección del efecto de borde, en todos los grupos cercanos al borde, exceptuando la pared norte. Como se ha mencionado desde un principio, el método propuesto busca obtener unos factores de corrección del factor de borde que sean dinámicos. Y en efecto es algo que se puede apreciar en el ajuste obtenido, en el que a bajos niveles de potencia calefactora el flujo medido por las HFS-Tiles tiene una baja modificación, mientras que en alta potencia es amplificado reduciendo el déficit de la medida por parte de las HFS-Tiles.

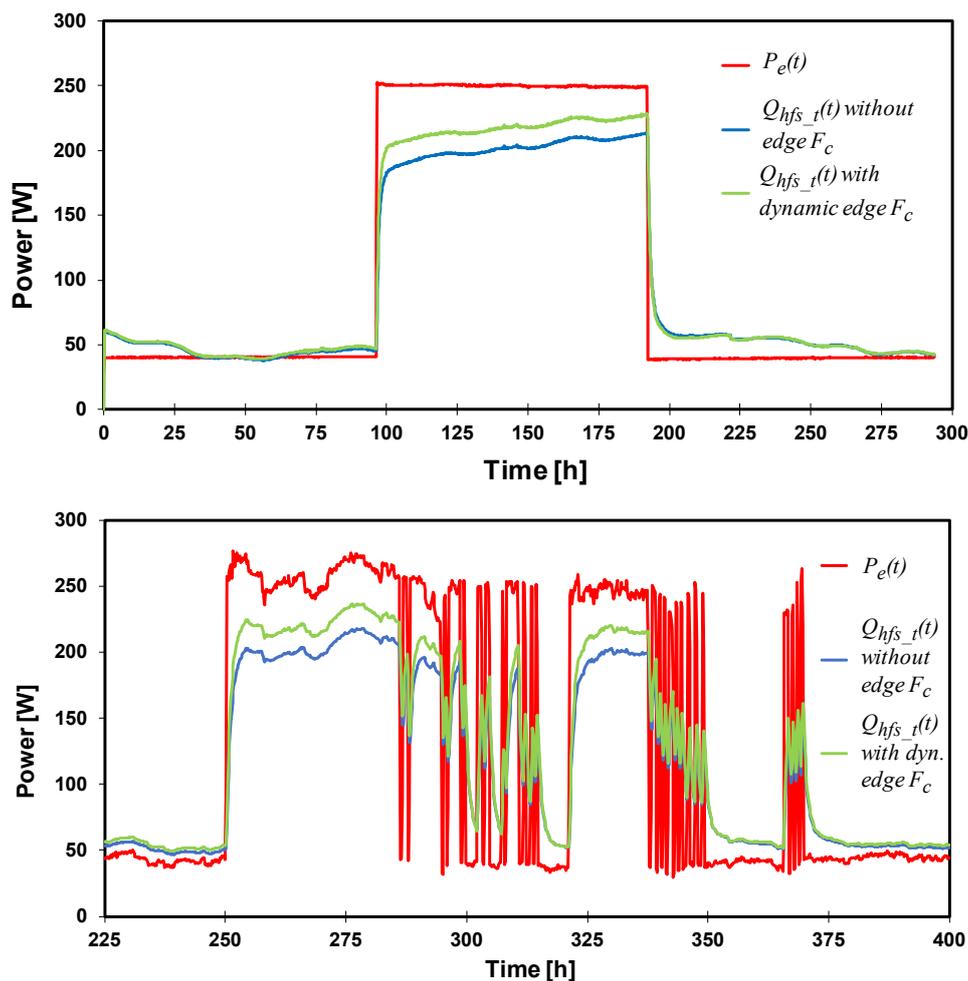


Figura 2.17 – Comparación de la señal de las HFS-Tiles con y sin corrección del efecto de borde, empleando factores dinámicos para las secuencias PULSO (superior) y ROLBS (inferior)..

En resumen, el método propuesto de los coeficientes de igualación para la determinación de factores dinámicos para la corrección de efectos de borde consta de los pasos que se listan a continuación. Debe remarcarse que este método se ha desarrollado para la mejora de la precisión de medida de la célula PASLINK, el equipo base para el trabajo experimental de la presente tesis, pero que en general es potencialmente aplicable/adaptable en general a equipamientos de caracterización térmica que requieran reducir la incertidumbre causada por el efecto de borde.

- Crear un modelo de elementos finitos con la geometría y propiedades de los componentes del borde a ser caracterizado.
- Hacer simulaciones dinámicas por un extenso periodo de tiempo, preferiblemente mayor que la constante de tiempo estimada para el modelo, usando las lecturas reales registradas durante el ensayo de calibración como las condiciones de frontera del modelo.
- Comprobar el ajuste entre los valores de flujo de calor medidos para los flujos qA , qB , y qC , con los obtenidos por la simulación. En esta etapa también es posible comprobar que el tamaño del modelo abarca por completo la zona afectada por el efecto de borde,

es decir, que el tamaño de malla se ha alejado lo suficiente del borde para incluir también parte de la zona de flujo unidimensional central.

- Si el ajuste entre la simulación y los datos medidos no es adecuado, debe revisarse y redefinirse la información empleada para la creación del modelo, ya sea información geométrica o de propiedades físicas, y repetir de nuevo la simulación dinámica.
- Empleando los valores medios para $q\theta$, qA , qB y qC obtenidos mediante la simulación, se usan procesos iterativos para determinar los valores para los coeficientes de igualación A' , B' y C' . Con esto se obtiene la expresión que permite hacer una aproximación del flujo de calor en el borde, prescindiendo del término $q\theta$ (ecuación (2.4)).
- La función obtenida permite determinar el factor dinámico de corrección del efecto de borde F_c (ecuación (2.5)) para cada instante de tiempo de las lecturas experimentales registradas por las Multi-Tiles en qA , qB y qC . Este proceso ha de repetirse para cada uno de los tipos de bordes considerados.

2.2.3. Resultados de aplicación del método a la célula EGUZKI.

2.2.3.1. Factor total $F_{c,t}$ usando el procedimiento PASLINK original

El factor de calibración total de la célula EGUZKI usando la señal de los grupos de las HFS-Tiles sin aplicar factores de corrección de borde, haciendo la comprobación de lecturas indicada por la metodología PASLINK tal y como se ha descrito en 2.2.1.2.2, y usando las tres secuencias de excitación térmica disponibles, ha sido:

$$F_{c,t}|_{PULSE} = 1,12 \text{ para la secuencia PULSO}[116],$$

$$F_{c,t}|_{PRBS} = 1,15 \text{ para la secuencia PRBS, y,}$$

$$F_{c,t}|_{ROLBS} = 1,13 \text{ para la secuencia ROLBS.}$$

Por tanto, se obtiene como valor final para el factor de calibración total de la célula EGUZKI es: $F_{c,t} = 1,13 \pm 0.02$ [102].

La metodología PASLINK admite un máximo de 1,2 para este factor. El valor obtenido es un indicador de la alta calidad de la célula EGUZKI. Sin embargo, esta precisión puede incrementarse aún más, como se ilustra en los resultados que se exponen seguidamente, usando el método de coeficientes igualatorios propuesto.

Factor de calibración total de la célula de ensayos usando factores dinámicos para la corrección de los efectos de borde.

2.2.3.2. Factor total $F_{c,t}$ usando factores dinámicos para la corrección de los efectos de bordes

El proceso descrito en la sección 2.2.2.2 ha sido aplicado para los cuatro tipos de borde restantes que requieren factor de corrección.

Se recuerda que en la Figura 2.3 se pueden apreciar los dos tipos de borde del lado de la sala de ensayos, el tipo T2 entre las paredes laterales o el techo con la pared sur y el tipo T3 entre el suelo y la pared sur. Igualmente, en la Figura 2.4 se pueden apreciar los dos tipos de borde del lado del muro de calibración: el tipo CWT2 correspondiente al encuentro entre el muro de calibración con las paredes laterales o el techo y el tipo CWT3 entre la zona inferior del muro de calibración y el suelo de la sala de ensayos.

Aunque el muro de calibración tiene una construcción similar a las paredes laterales de la célula, el flujo de calor que cruza este muro difiere del que cruza las paredes laterales. Esto se debe a su menor área y también al efecto que tiene el cambio en geometría y materiales asociado a la necesidad de un premarco que permita montar y desmontar tal muro de calibración. Es por ello que a diferencia de los efectos de borde del tipo T1, donde el factor de corrección del efecto de borde es válido tanto para los grupos de borde de HFS-Tiles en la pared como los del techo, en el caso de los encuentros de la célula con el muro de calibración, se aplica un factor de corrección del lado de la célula y otro distinto del lado del muro de calibración, dando origen a los tipos CWT2 and CWT3.

Finalmente, queda un quinto tipo de efecto de borde, que como ya se ha comentado la metodología PASLINK permite ignorar. Se trata del borde tipo T4, correspondiente al encuentro de las paredes longitudinales de la célula con el muro norte. Para este efecto de borde el factor de corrección es la unidad.

La Figura 2.18 muestra el campo de temperaturas y los perfiles del flujo de calor obtenidos para las superficies interiores en la zona de encuentro entre la pared este y el muro de calibración (zona de T2 y CWT2), mientras que la Figura 2.19 corresponde al encuentro con el suelo (zona de T3 y CWT3).

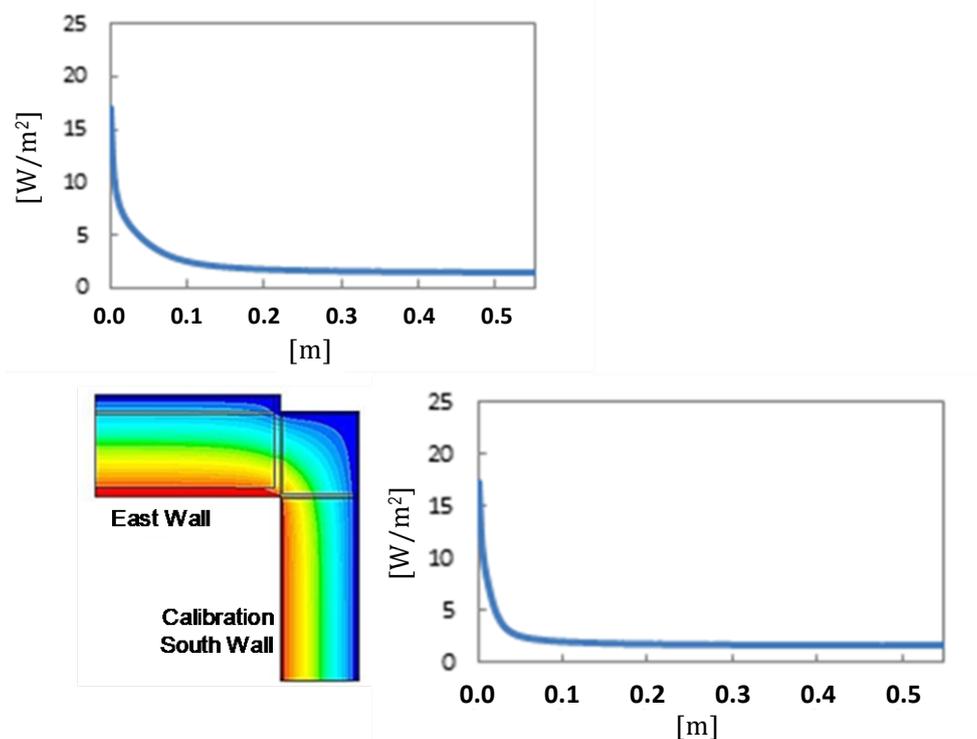


Figura 2.18 – Modelo de simulación del borde tipo T2 con sus correspondientes perfiles de flujo de calor superficial.

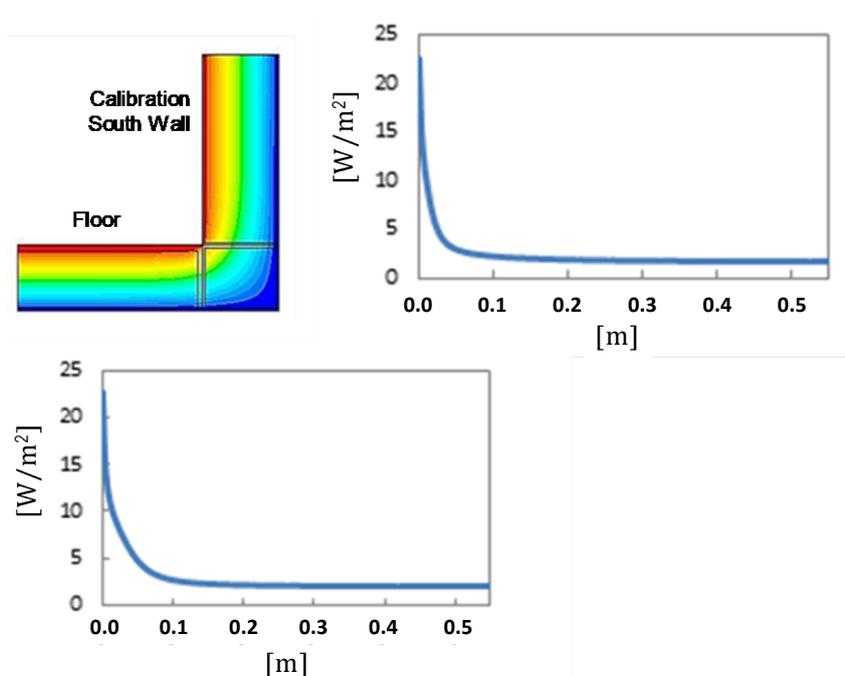


Figura 2.19 – Modelo de simulación del borde tipo T3 con sus correspondientes perfiles de flujo de calor superficial.

El flujo de calor es suavemente mayor en la zona inferior del muro de calibración que en la superior, debido a la diferencia de materiales y espesores del aislamiento térmico empleado como relleno del marco perimetral: paneles de vidrio celular en la zona inferior y poliuretano expandido en los laterales y zona superior.

Los factores de corrección del efecto de borde en el muro de calibración, los factores CWT2 y CWT3 ajustan la medida del flujo de calor que efectivamente cruza este componente, y resultan cruciales tanto para la determinación del factor de calibración total de la célula $F_{c,t}$.

Los efectos de borde de tipo T1 y tipo T4 son fenómenos típicos de la estructura de la célula, y previsiblemente tendrán un comportamiento similar en los posteriores ensayos de futuras muestras. En el caso de los bordes de tipo T2 y T3 en la abertura sur de la sala de ensayos, dependerán en parte de las características de la propia muestra en ensayo. El muro de calibración es la muestra PASLINK con el mayor nivel de aislamiento térmico posible, con lo cual es la muestra que causará el mayor efecto posible en estos bordes de tipo T2 y T3.

A consecuencia de esto, en el caso de la abertura sur el uso de factores de corrección dinámicos hace un ajuste mucho más adaptado a las condiciones generadas por la muestra, que si se usa un factor de corrección constante. Este último sobreestimaría la corrección del efecto de borde, pues las muestras en ensayo son mucho menos aislantes que el muro de calibración.

La aplicación del método de coeficientes de igualación produce las correlaciones de la Tabla 2.2 y de la Tabla 2.3 para la sala de ensayos. Así mismo, para el caso del muro de calibración se obtienen las correlaciones de la Tabla 2.4. Estas correlaciones permiten determinar los correspondientes factores de corrección F_c para cada tipo de borde, en cada paso de tiempo del ensayo.

Tabla 2.2. – Correlación obtenida para el factor de corrección del efecto de borde en los encuentros longitudinales de la célula de ensayo. Efecto de borde de tipo T1.

Factor Type	Correlation
$F_{c(T1)}$	$\frac{290.20 \cdot qA + 368.13 \cdot qB + 609.18 \cdot qC}{1090 \cdot qB}$

Tabla 2.3. – Correlación obtenida para el factor de corrección del efecto de borde en la abertura sur de la célula de ensayo. Efectos de borde de tipo T2 y T3.

Factor Type	Correlation
$F_{c(T2)}$	$\frac{176.17 \cdot qA + 367.77 \cdot qB + 867.36 \cdot qC}{1090 \cdot qB}$
$F_{c(T3)}$	$\frac{360.72 \cdot qA + 381.14 \cdot qB + 596.43 \cdot qC}{1090 \cdot qB}$

Tabla 2.4. – Correlación obtenida para el factor de corrección de los efectos de borde en el muro de calibración. Efectos de borde de tipo CWT2 y CWT3.

Factor Type	Correlation
$F_{c(CWT2)}$	$\frac{175.88 \cdot qA + 367.57 \cdot qB + 867.19 \cdot qC}{1090 \cdot qB}$
$F_{c(CWT3)}$	$\frac{294.47 \cdot qA + 340.14 \cdot qB + 562.40 \cdot qC}{1090 \cdot qB}$

Finalmente, el valor del factor de calibración total de la célula, obtenido como el promedio de las tres repeticiones del ensayo de calibración, usando las tres diferentes secuencias de excitación expuestas, y corrigiendo el efecto de borde en las lecturas de las HFS-Tiles mediante factores dinámicos, es

$$F_{c_t} = 1.06 \pm 0.02$$

Por tanto, en el caso de la célula EGUZKI, el error de medida del calor transferido a través de su envolvente se reduce de 13% a 6% aplicando el método aquí desarrollado. Esto implica una reducción del error en torno a 1/2.

2.3. Caracterización experimental de la solución FVFF

Una vez que se han expuesto en los subapartados anteriores las labores de mejora de precisión del equipo base para la fase experimental de la presente tesis, la célula PASLINK, se procede a exponer el desarrollo de las actuaciones y resultados obtenidos por los ensayos para la muestra de fachada ventilada forzada fotovoltaica (FVFF).

2.3.1. Configuración del experimento y de la muestra

En la Figura 2.20 se aprecia la muestra de fachada ensayada en la célula EGUZKI, con un esquema de las secciones que la componen. Se ha empleado como muro base una fábrica de bloques de hormigón de 15,6 cm de espesor, enlucido con 1,5 cm de yeso por el interior y revocado con 1,5 cm de mortero de cemento por el exterior. La capa aislante exterior está formada por paneles de lana mineral de 5 cm de espesor, integrada con las piezas estructurales portantes de la hoja de vidrios fotovoltaicos de 1,5 cm de espesor, formando una cámara de aire ventilada de 10 cm de espesor. Se han montado un total de seis elementos de vidrios fotovoltaicos. Un tablero de madera hace el cierre inferior dejando una abertura de entrada libre de aire de 10 cm, mientras que el remate superior lo hace una pieza de chapa metálica galvanizada fabricada a medida para encajar con tres tolvas superiores de extracción. En esta zona de cierre superior todos los bordes de unión han sido sellados con cordón de silicona

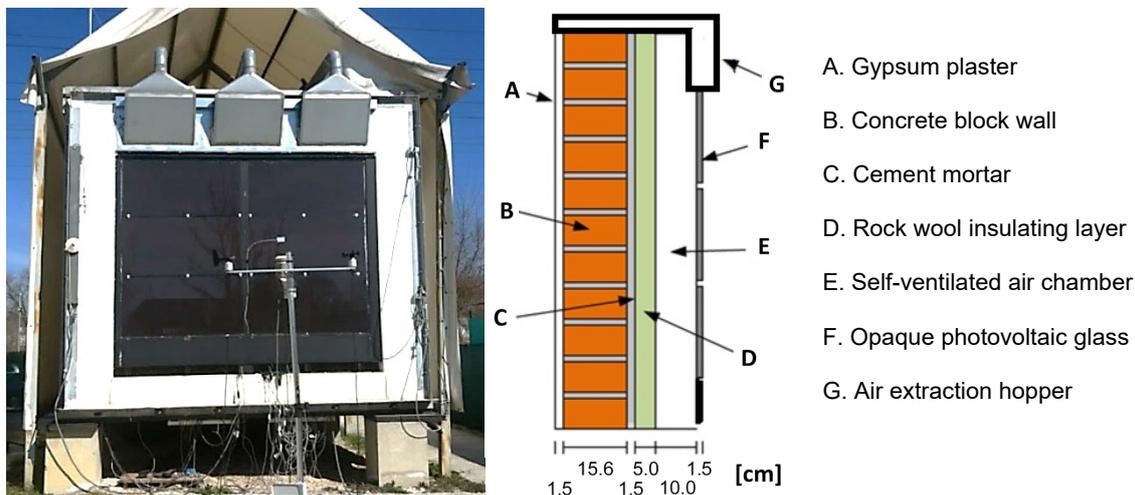


Figura 2.20 – Muestra ensayada y esquema de la sección de fachada FVFF

La cualidad en la célula de ensayos de que la cara sur sea intercambiable mediante el uso de un marco porta muestras desmontable, estructuralmente reforzado y aislante, permite que la albañilería de la muestra sea ejecutada aparte en un ambiente interior controlado. Una vez fraguado y seco el muro base con sus revestimientos, la muestra fue transportada hasta la célula, en la que se terminó el montaje de las capas restantes, el sistema de extracción y la instrumentación de medida (ver Figura 2.21).

A nivel de instrumentación de medida se tienen dos grupos principales. Un grupo formado por los instrumentos pertenecientes a la propia célula de ensayos y que están disponibles para todo ensayo, y otro grupo formado por la instrumentación destinada a monitorizar la muestra. Dentro de la instrumentación propia de la célula, se tienen los sensores listados en la Tabla 2.5

que miden las condiciones ambientales exteriores, y los listados en la Tabla 2.6 destinados a medir y controlar las condiciones interiores de la sala de ensayos.



Figura 2.21 – Dos etapas del proceso de fabricación de la muestra y aspecto del sistema de extracción de aire de cámara instalado sobre la célula de ensayo

Tabla 2.5 – Instrumentación para las condiciones climáticas exteriores de la zona PASLINK.

Parámetro	Instrumento	Rango	Precisión
Radiación Global Horizontal “Gh”	Kipp & Zonen CMP11 Piranometer	-200 to 2000W/m ²	+/- 3%
Radiación Global Vertical Sur “Gv”			
Radiación Horizontal Difusa			
Temperatura de aire en 5 puntos en el entorno exterior de la célula	PT100 sensors class A 1/5 DIN protegidos contra radiación	-20 to 60°C	±0.2°C
Temp. Sup. 3 puntos alrededor de la célula	PT100 sensors class A 1/5 DIN		
Presión Barométrica	VAISALA WXT 510 Meteorological Station 10 m	600 to 1100 hPa	+/- 0.5 hPa
Temperatura de Aire		-52 to 60 °C	+/- 0.3 °C
Velocidad de viento		0 to 60 m/s	+/- 3%
Dirección de viento		0 to 360 °	+/- 3.0 °
Humedad Relativa		0 to 100 %RH	+/- 3%RH
Velocidad de viento delante de célula	Almemo FVA 615-2	0.5 to 50 m/s	+/- 3%
Dirección de viento delante de célula	Almemo FVA 614	0 to 360 °	+/- 3.0 °
Temperatura del aire delante de la célula	PT100 class A 1/5 DIN protegida contra radiación y ventilada	-20 to 60°C	±0.2°C

Tabla 2.6 – Instrumentación de la sala de ensayos de la célula PASLINK.

Parameter	Instrument	Range	Precision
Consumo de potencia eléctrica en sala de ensayos, resist. y ventilad.	Sineax M562 multi-transducer	0 to 1000 W	± 0.4%
Temperatura de aire en 8 puntos dentro de la sala de ensayos	PT100 sensors class A 1/5 DIN shielded against radiation	-20 to 60°C	±0.2°C
Temperatura sup. en 9 puntos dentro de la sala de ensayos	PT100 sensors class A 1/5 DIN		
Flujo de calor que cruza las superficies interiores de la célula de ensayos	257 heat flux sensors attached to aluminium tiles called Heat Flux Sensitive Tiles “HFS-Tiles”		+/- 5%
Estanquidad al aire de la célula, antes y después de los ensayos	Manómetro de presión diferencial tipo DPS	0 – 1 mbar	± 1%
	Caudalímetro másico FMT200-ECO2	1...100 kg/h 12...1250 NI/min	± 3,0%

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

HP Agilent 34980A con 5 tarjetas multiplexoras 34921A y un módulo de control 34951A.
Data Acquisition Software developed by AT-LCCE in C++

En la muestra se ha insertado la instrumentación indicada en la Figura 2.22 cuyas especificaciones se listan en la Tabla 2.7.

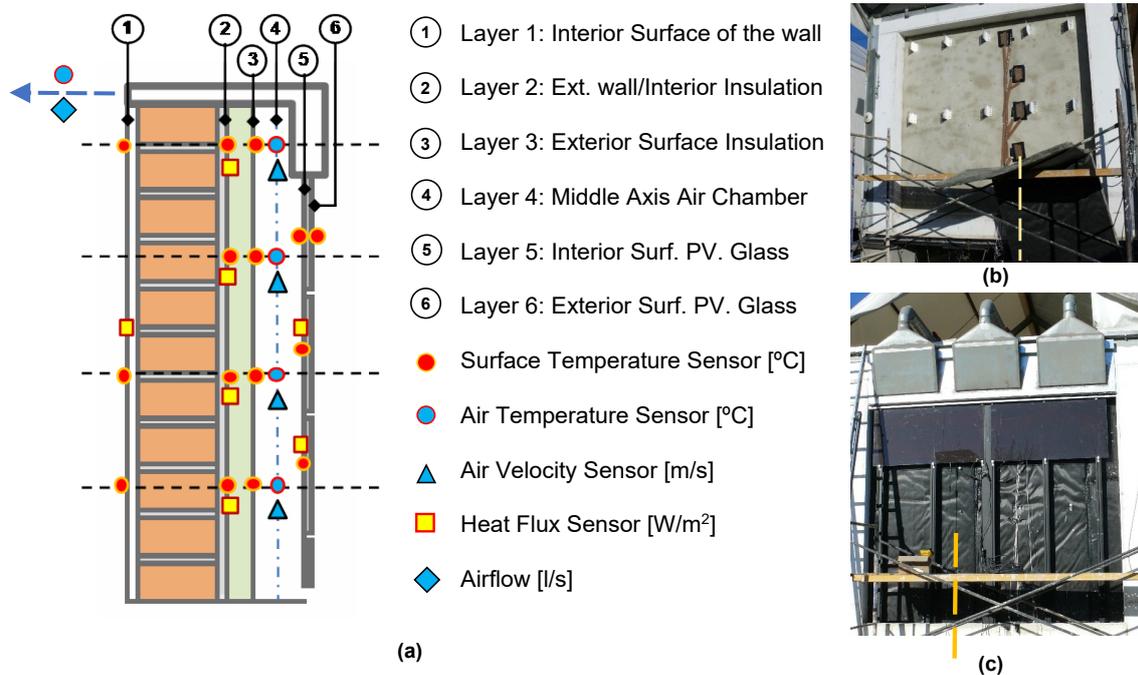


Figura 2.22 – a) Instrumentación dispuesta en sección de muestra, a cuatro alturas. b) Sensores alineados en la cara exterior de muro – Capa 2. c) Instalación de sensores en cámara.

Tabla 2.7 – Instrumentación dispuesta en la muestra FVFF.

Parámetro	Instrumento	Número y ubicación	Rango/Factor	Precisión
Medida del flujo de calor superficial	Almemo PTFE plates reference 150-1	1 en la capa interior 1	50 to 120 (W/m ²)/mV	±5%
		4 en la capa intermedia 2		
		4 en la capa del aislamiento 3		
Temperatura superficial	PT100 sensors class A 1/5 DIN	3 en la capa interior 1	-20 to 60°C	±0.2°C
		4 en la capa intermedia 2		
		4 en la capa del aislamiento 3		
		3 en sup. int. PV Glass capa 5		
Temperatura del aire en el eje vertical de cámara	PT100 sensors class A 1/5 DIN	1 en sup. ext. PV Glass capa 6	-20 to 60°C	±0.2°C
		1 a 0,6 m de altura, capa 4		
		1 a 1,2 m de altura, capa 4		
		1 a 1,8 m de altura, capa 4		
		1 a 2,4 m de altura, capa 4		
Velocidad del aire en el eje vertical de cámara	Hot Film Anemometer EE66-V	1 a 0,6 m de altura, capa 4	0 to 1 m/s	±0.04 m/s ±2% mV
		1 a 1,2 m de altura, capa 4		
		1 a 1,8 m de altura, capa 4		
		1 a 2,4 m de altura, capa 4		
Caudal de aire extraído de cámara	Differential pressure transmitter Kimo CP301-HOP/SPI-100 with pitot system	En el conducto de extracción de aire de la cámara ubicado encima de la célula.	-100 to 100 Pa	±0.5%
Temperatura de aire extraído de cámara	PT100 sensors class A 1/5 DIN		-20 to 60°C	±0.2°C

2.3.2. Ejecución de los ensayos y resultados experimentales

2.3.2.1. Periodos de ensayo y secuencias de excitación térmica empleadas

La muestra ha sido ensayada en condiciones de invierno y de verano, durante periodos de 15 días, en los que se han tenido días claros completamente soleados y días parcialmente nublados. El periodo de ensayo de invierno transcurrió desde el 1 hasta el 15 de marzo, mientras que el periodo de verano fue desde el 30 de julio hasta el 13 de agosto.

Durante el periodo de invierno se aplicó una secuencia ROLBS de excitación térmica con intervalos de calefacción de alta potencia en torno a 520 W (Figura 2.23 izq.). En el periodo de verano no se aplicó excitación calefactora (Figura 2.23 der.), fundamentalmente para proteger la celda de sobrecalentamiento interno. El ensayo de verano se hizo con el objetivo de contrastar la fiabilidad del modelo obtenido a partir de la caracterización experimental realizada en invierno y en su caso, hacer leves ajustes como finalmente sucedió. En ambos periodos de ensayo se aprecia la potencia base continua en torno a los 50 W correspondiente al consumo del ventilador que mantiene el aire interior de la celda en circulación permanente. Como se aprecia, el flujo de calor medido por las HFS-Tiles es siempre menor que la energía suministrada por el calefactor, siendo la diferencia el flujo de calor transferido a través de la muestra. Este aspecto será tratado más adelante, en el apartado de modelado de la fachada.

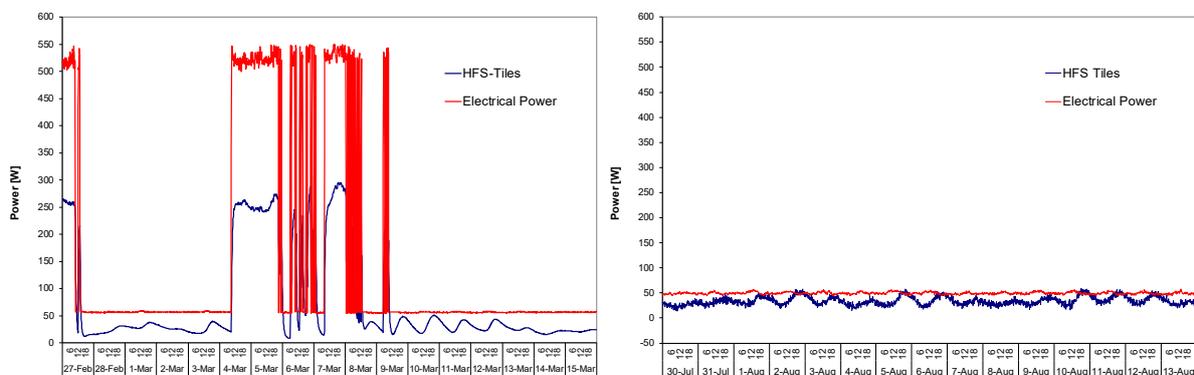


Figura 2.23 – Potencia eléctrica calefactora y medida por HFS-Tiles. Secuencia ROLBS para invierno (derecha) y sin secuencia alguna en verano (izquierda)

2.3.2.2. Control del caudal de extracción

En la Figura 2.24 se aprecia el funcionamiento del control del caudal de extracción de aire de la cámara ventilada durante el ensayo en invierno, mostrando los dos niveles definidos para este caudal. El control ha funcionado correctamente, activando un nivel de caudal de extracción alto de 200 l/s cuando el salto térmico entre la superficie exterior de fachada y el aire ambiente exterior superaba los 5 °C. De lo contrario el caudal permaneció en su valor mínimo de 10 l/s.

Por su parte la Figura 2.25 expone el mismo funcionamiento de la fachada en el periodo estival. Mientras que la respuesta del sistema de extracción es semejante, nótese el menor salto de temperaturas entre la superficie de la hoja fotovoltaica y el aire exterior para el verano, asociado a la menor radiación vertical incidente. Más adelante se analiza la radiación y las condiciones ambiente en general para los dos periodos.

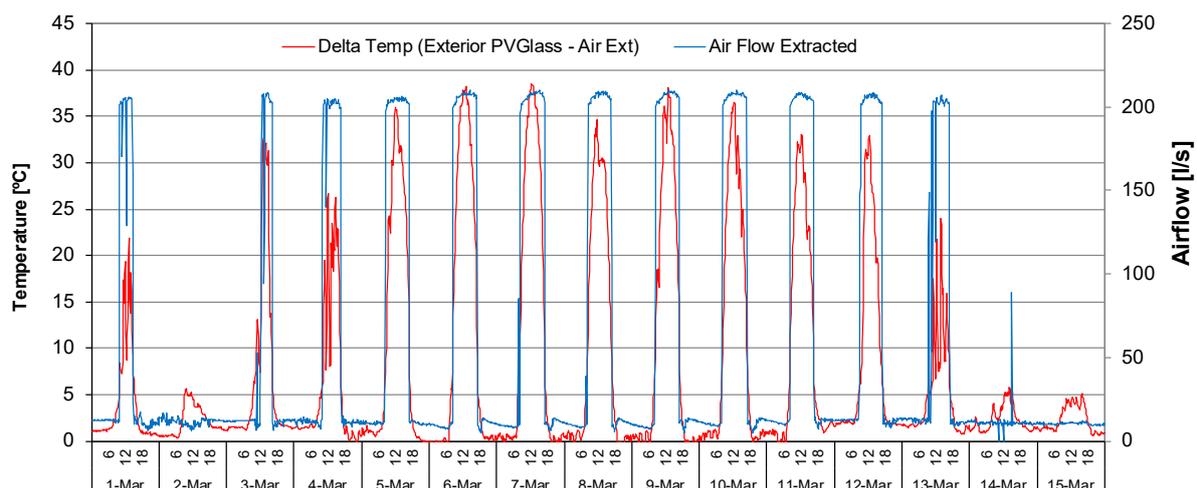


Figura 2.24 – Caudal de extracción comparada con su señal de control en el periodo invernal

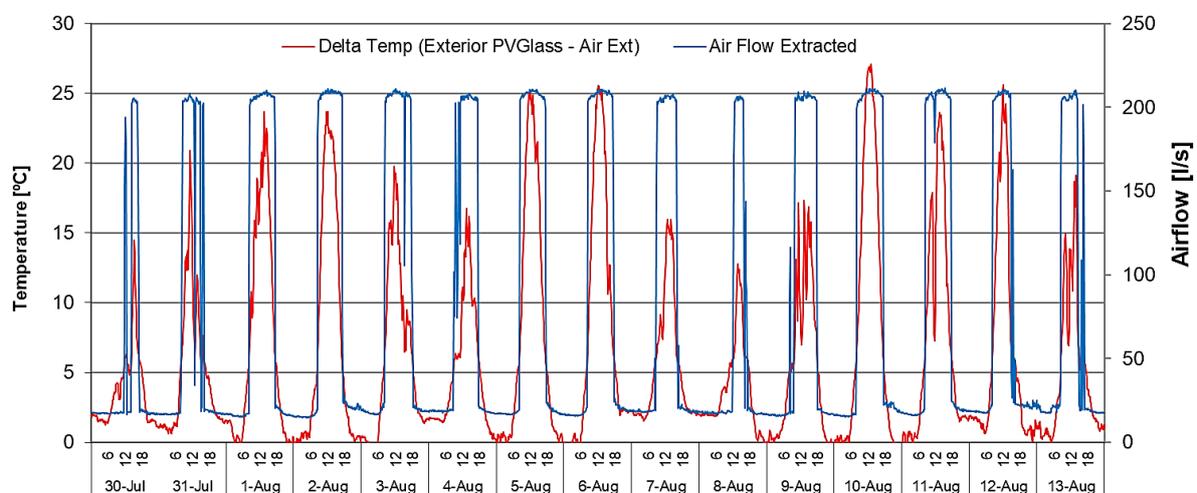


Figura 2.25 – Caudal de extracción comparada con su señal de control en el periodo estival

2.3.2.3. Radiación solar en los dos periodos de ensayo

Tal y como se acaba de exponer, la diferencia de la temperatura en la superficie exterior de la hoja de vidrios fotovoltaicos respecto al ambiente exterior se mostró menor en verano que en invierno. Este comportamiento es resultado del nivel de radiación solar directa incidente en la fachada sur. Por ello se consideró interesante hacer una breve descripción de los niveles registrados para la radiación solar incidente, tanto horizontal como vertical sur.

Como se ha indicado, se monitoriza la radiación solar incidente sobre la muestra, siendo “radiación horizontal (G_h)” la radiación global solar directa incidente en superficie horizontal, y “radiación vertical (G_v)” la radiación global incidente en superficie vertical con inclinación 90° y orientada al sur.

En invierno la proporción entre la radiación horizontal y la vertical es diferente para los días claros y los días nublados. En los días claros de invierno la radiación vertical es siempre mayor debido a la baja altura de la trayectoria solar. El máximo valor registrado para la

radiación vertical ha sido de 910,20 W/m², mientras que la horizontal ese mismo día fue de 740 W/m². Se tiene entonces que en el día de máximo soleamiento en invierno la radiación vertical puede ser hasta un 23% mayor que la horizontal. Por otra parte, en condiciones de día nublado de invierno, la radiación horizontal es siempre mayor que la vertical, incluso el doble, y ambas han estado por debajo de los 200 W/m². En la Figura 2.26 se puede apreciar el comportamiento descrito.

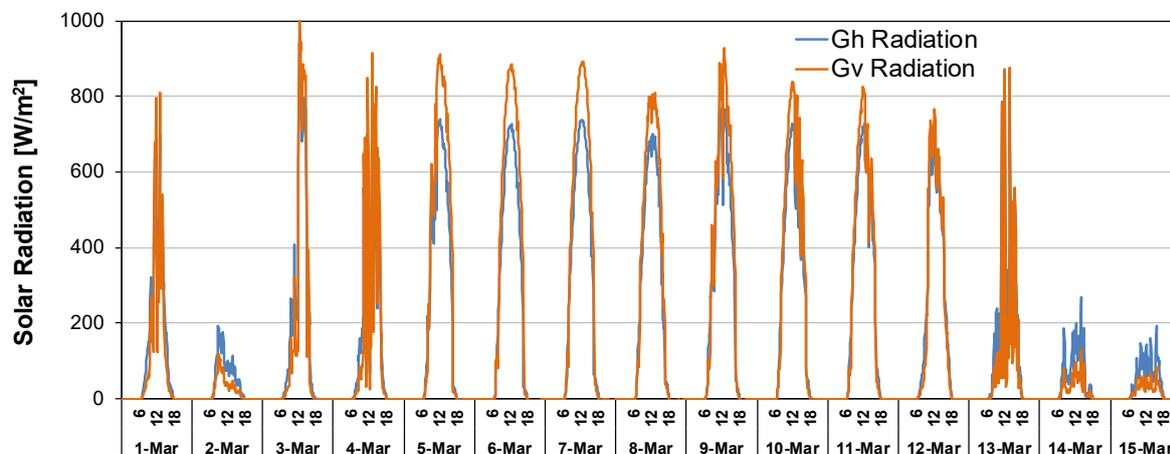


Figura 2.26 – Radiación solar directa incidente en plano horizontal y vertical, invierno

En verano la radiación horizontal es siempre mayor que la vertical tanto en días claros como nublados. El día de máximo soleamiento ha registrado una radiación horizontal de 959,2 W/m², mientras que la radiación vertical fue de 575,9 W/m² (Figura 2.27). Se tiene entonces que, en un día completamente claro, de máximo soleamiento en verano la radiación horizontal puede ser hasta un 67% mayor que la vertical.

La intensidad de la radiación solar directa incidente sobre la fachada vertical sur durante un día claro en verano es mucho menor que la correspondiente al invierno, incluso la mitad. A cambio, durante el verano hay más frecuencia de días claros, lo que puede compensar el cómputo global de energía total recibida durante la estación.

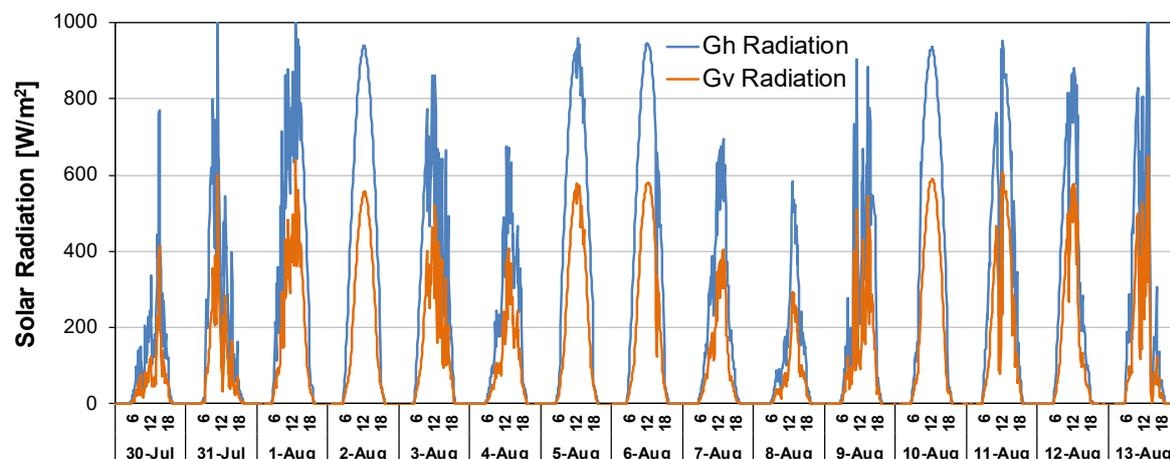


Figura 2.27 – Radiación solar directa incidente en plano horizontal y vertical, verano.

2.3.2.4. Temperaturas medias durante los periodos de ensayo

A continuación, se expone el comportamiento registrado para las temperaturas de las capas monitorizadas en la sección de la muestra. El valor graficado corresponde al valor medio de los distintos puntos monitorizados a lo ancho y alto de cada capa, normalmente cinco puntos en arreglo estrella. La evolución de la temperatura en la cámara con extracción forzada se trata con más detalle en un subapartado aparte.

La Figura 2.28 muestra la variación del valor medio de temperatura en cada una de las seis capas monitorizadas en la muestra y de la temperatura del aire exterior para el periodo de ensayo en invierno. La Figura 2.29 muestra las mismas variables para el periodo de ensayo en verano.

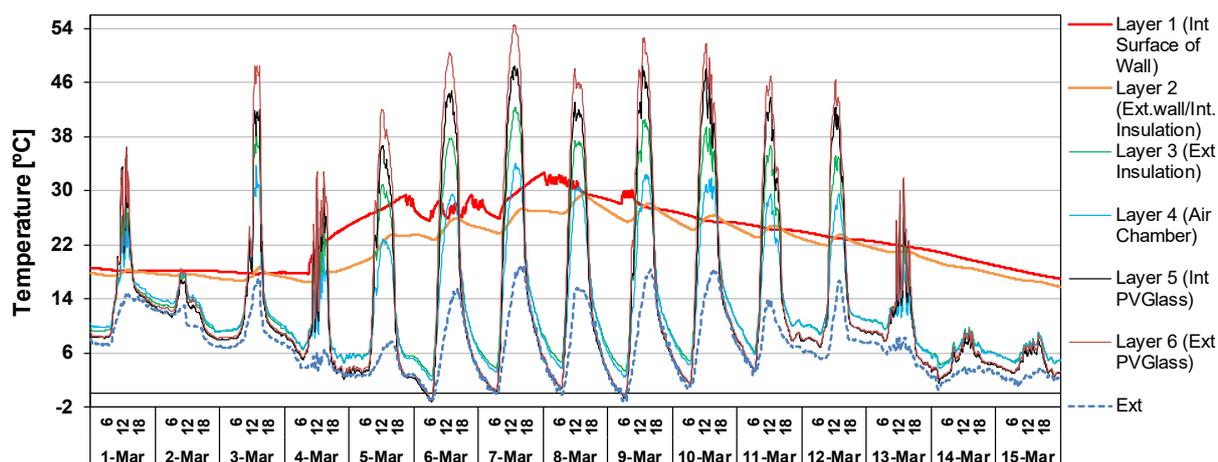


Figura 2.28 – Evolución de temperaturas en las capas de fachada, marzo

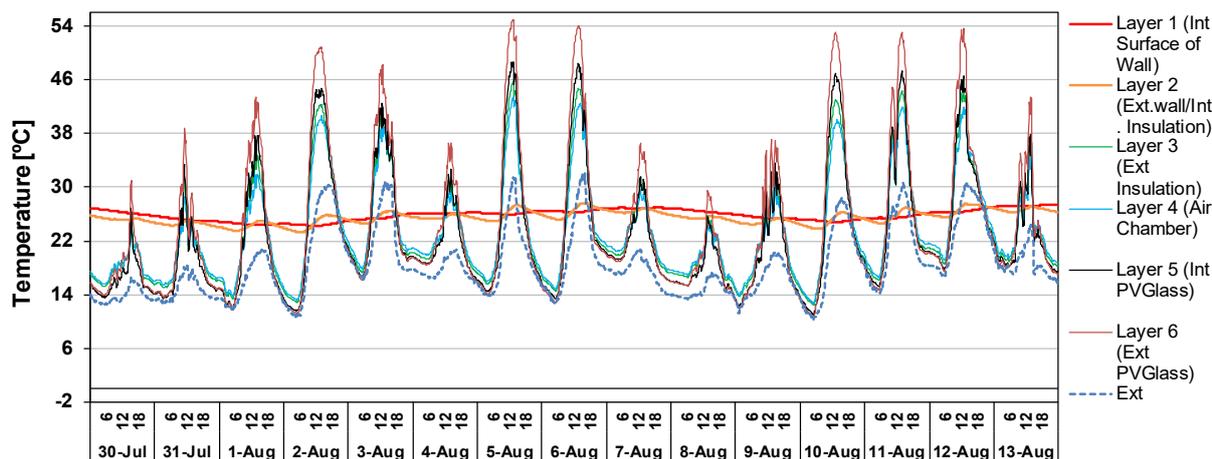


Figura 2.29 – Evolución de temperaturas en las capas de fachada, agosto

La temperatura exterior en invierno se aproxima a valores de cero grados Celsius, hasta cinco noches consecutivas. Tanto en invierno como en verano, el valor mínimo ocurre al amanecer en torno a las seis de la mañana, siendo más acusado en periodos de cielo despejado

La Tabla 2.8 lista valores descriptivos de la temperatura exterior en los dos periodos de ensayo, tanto diurnos como nocturnos, así como la media de cada periodo. También se incluye el valor medio de temperatura exterior para invierno y para verano, determinado a partir de los registros de seis años previos.

Los valores registrados para la temperatura exterior permiten considerar que cada periodo de ensayo es representativo de sus correspondientes estaciones climáticas, con la suficiente variabilidad y frecuencia de días claros para realizar el análisis deseado.

Durante el ensayo la velocidad de viento y la humedad relativa exterior también fueron monitorizadas. En particular no se detectó una importante dependencia del comportamiento de la fachada a la velocidad de viento, especialmente si la fachada operaba en modo de alto caudal de extracción, tal y como se expone en el posterior apartado de velocidades de aire en cámara.

Tabla 2.8 – Valores de temperatura de referencia en los dos periodos de ensayo.

	Invierno				Verano			
	Noche	Día	Periodo de ensayo	Est. met. oficial – Seis años [136]	Noche	Día	Periodo de ensayo	Est. met. oficial – Seis años [136]
Máximo [°C]	14,3	19,0			23,4	32,0		
Medio [°C]	5,3	9,1	7,1	5,0	15,2	20,5	18,3	18,5
Mínimo [°C]	-1,0	-0,8			10,2	11,9		

Las temperaturas superficiales a uno y otro lado del muro base (capas 1 y 2) muestran el comportamiento característico de un muro con aislamiento, tendiendo cada cual a seguir las condiciones del ambiente interior o exterior según corresponda. Si no hay excitación térmica calefactora en el interior de la célula, la temperatura interior varía muy suavemente y la exterior varía según la influencia de las condiciones exteriores, pero sin producirse una diferencia entre las dos por encima de los 2 °C. Por el contrario, en los instantes de excitación térmica interior la diferencia entre estos valores aumenta hasta un máximo de 7 °C.

El resto de temperaturas monitorizadas en la muestra, permiten hacer el seguimiento del comportamiento en la zona de cámara ventilada que se expone en el apartado siguiente. Como era de esperar, la evolución observada en los dos periodos de ensayo hace evidente la dependencia de las condiciones térmicas de la cámara respecto a las condiciones de soleamiento exterior.

2.3.2.5. Temperaturas y ganancia térmica en la cámara ventilada

2.3.2.5.1. Temperaturas.

La temperatura del aire en la cámara fue siempre superior a la temperatura ambiente exterior. Esto ocurre tanto en periodos soleados como nublados, diurnos o nocturnos, tal y como lo ha mostrado la evolución de temperatura descrita anteriormente para los dos periodos de ensayo.

En el periodo invernal, el aire de cámara puede alcanzar 17 °C de calentamiento respecto al aire ambiente exterior en los días soleados, mientras que, en días nublados, a pesar de tener una radiación incidente por debajo de 100 W/m², se registraron calentamientos del orden de 5 °C. Así mismo, durante las noches de invierno el aire de cámara se mantenía al menos 2 °C por encima del ambiente exterior, o incluso el doble si el día anterior había sido completamente soleado.

La temperatura del caudal del aire fue medida en cuatro alturas diferentes a lo largo de la cámara (Figura 2.30), y la evolución de estos valores durante el ensayo de invierno puede apreciarse en la Figura 2.31. Los periodos en que se registran valores de temperatura altos, naturalmente coinciden con los periodos de alta incidencia de radiación solar, pero a su vez son los periodos en que los que la fachada activaba un alto caudal de extracción. En los periodos nocturnos o nublados, el valor de la temperatura del aire a lo alto de la cámara variaba poco. Por el contrario, en los periodos soleados, las temperaturas después de 1.2 m se mostraban cercanas y superiores a la registrada en los 0.6 m.



Figura 2.30 – Altura de los sensores en cámara respecto a la cota de entrada de aire: 0,6; 1,2; 1,8 y 2,4 m

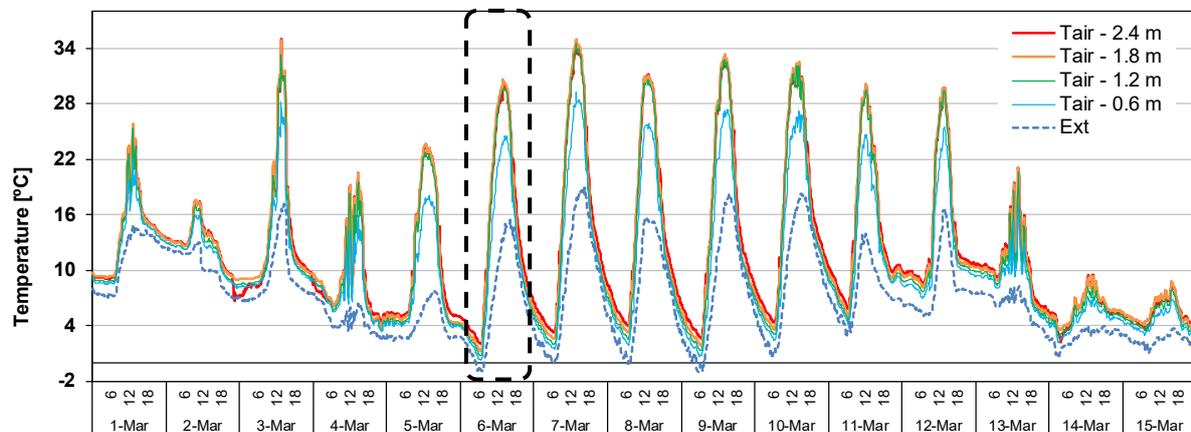


Figura 2.31 – Variación de temperatura en altura para el eje central del caudal de aire en la cámara durante el periodo de ensayo en invierno

Para mostrar en detalle el comportamiento térmico de la fachada FVFF a lo largo del día, se ha seleccionado el día 6 de marzo, un día soleado del periodo invernal (Figura 2.32). La evolución de las temperaturas en las distintas capas durante este día se muestra en la Figura 2.33, representadas por su valor medio. Se aprecia la ágil respuesta térmica a la radiación solar directa en los instantes de cielo despejado, por parte de las superficies que confinan la zona de cámara ventilada. Estas superficies describen un gráfico de campana proporcional a la intensidad de radiación incidente.

La Figura 2.34 muestra el perfil de temperaturas para la sección de fachada, en varios instantes a lo largo del día. La baja resistencia térmica del muro base en sus 18 cm de espesor, queda evidenciada en el bajo salto térmico entre sus caras. Por el contrario, la capa aislante en sus 5 cm de espesor puede generar saltos térmicos de hasta 20 grados centígrados en la madrugada.

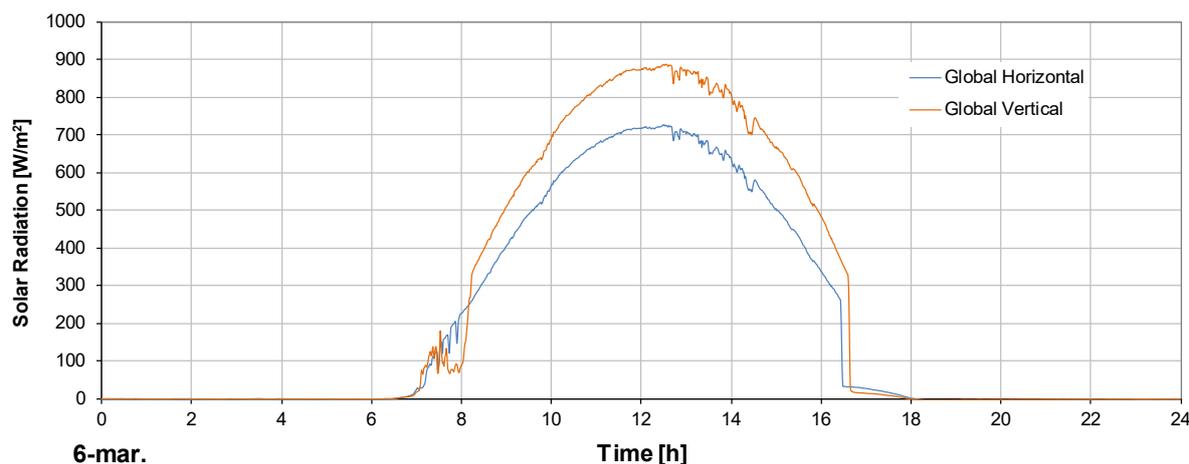


Figura 2.32 – Radiación Global Horizontal y Vertical para el 6 de marzo, un día soleado.

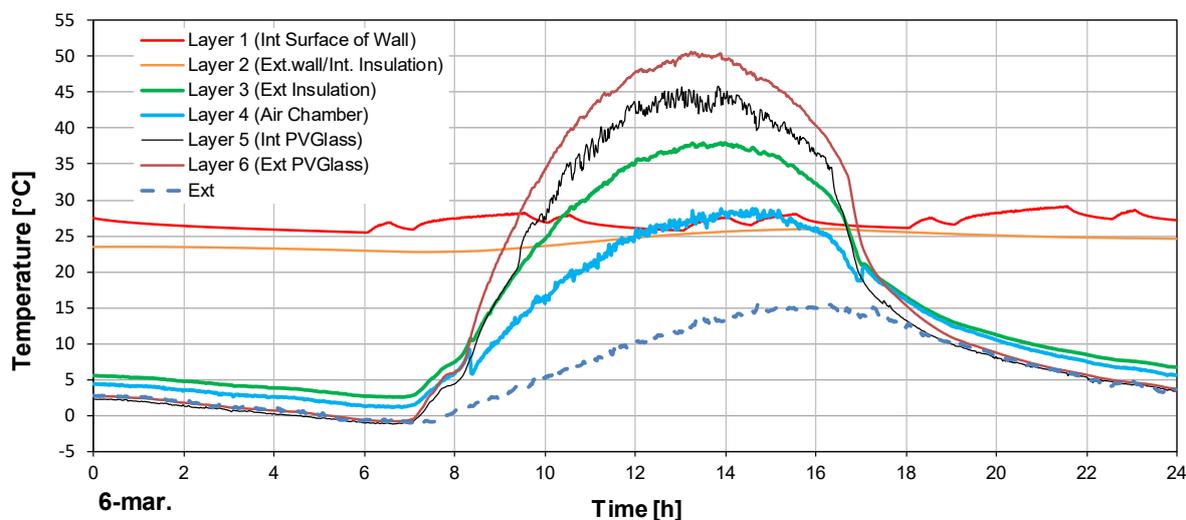


Figura 2.33 – Variación de la temperatura media en cada una de las capas de la solución FVFF a lo largo de un día soleado de marzo

Las superficies que rodean la cámara ventilada y la cámara en si misma muestran su carácter dinámico en días soleados. La hoja exterior alcanza 50 °C en un día con 15 °C de temperatura ambiente. La superficie del aislante que mira a la cámara consigue hasta los 36 °C sobre las dos de la tarde, en gran parte por su importante intercambio por radiación con la hoja fotovoltaica, devolviendo de forma convectiva una importante parte de esta energía al flujo en la cámara. En los periodos sin sol, el principal aporte de energía viene desde el interior por conducción desde el muro base y a través del aislamiento. En esta condición el caudal base de la cámara ventilada actúa capturando y transportando esa energía. Es un comportamiento que ocurre hasta en el momento más frío del día, justo antes de salir el sol en torno a las siete de la mañana, en el que el ambiente exterior había alcanzado la temperatura mínima de 0,9 °C, pero la cámara se mantenía dos grados centígrados más caliente.

Evidentemente, el aire en la cámara tiene un mayor calentamiento cerca de la superficie más caliente, ya sea la cara exterior del aislamiento o la interior de la hoja de vidrios fotovoltaicos. En concordancia con los cambios de condiciones diurnas a nocturnas, estas dos

superficies se alternan la condición de más caliente. *Es un fenómeno relevante que fue tenido en cuenta para el paso siguiente tras la fase experimental: el modelamiento del intercambio térmico en la cámara.* En función de las temperaturas superficiales el arrastre de la columna de aire será distinto en la superficie de aislante que en la del vidrio fotovoltaico para los periodos nocturnos y diurnos, alterando la magnitud de los correspondientes coeficientes convectivos.

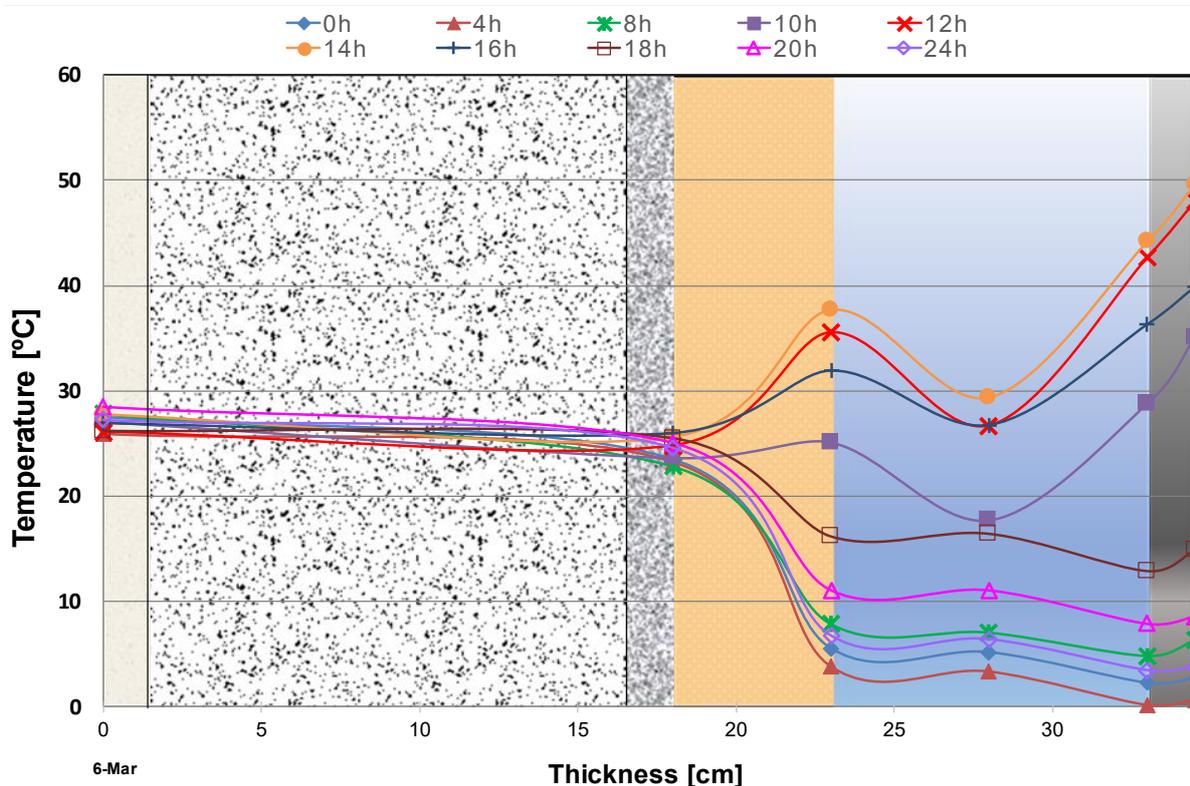


Figura 2.34 – Variación horaria del perfil de temperatura en sección de la solución FVFF

La temperatura del aire en cuatro alturas del eje central de la cámara ventilada para diferentes horas del día se muestra en la Figura 2.35. La estrategia de control del caudal de extracción basada en el salto térmico entre fachada y ambiente exterior hace que en los periodos nocturnos o nublados el caudal de extracción se posicione en modo de bajo caudal (10 l/s). Este ha sido el caso de las horas cero, dos, seis, veinte, veintidós y veinticuatro. En este régimen de bajo caudal la temperatura del aire aumenta de forma muy regular. El aire finalmente extraído de la cámara gana entre dos y tres grados centígrados respecto al exterior. En los primeros 60 cm de altura de cámara el aire ya ha conseguido casi la mitad de ese calentamiento. En el siguiente metro y medio la ganancia de temperatura decrece de forma casi geométrica. El rápido decrecimiento en la ganancia de temperatura con la altura, indica que incluso en los periodos de bajo caudal de extracción de esta fachada, el flujo tiende a tener condición de flujo desarrollado térmicamente y que la altura de la muestra alcanza a ser suficiente para obtener tal condición. Debe recordarse que la altura de la muestra es la habitual de una planta de edificio, de 2,7 metros.

Las curvas de evolución de la temperatura del aire al ascender por la cámara en esta configuración de la fachada a bajo caudal de extracción, revelan un leve a moderado aumento del calentamiento en el punto de medida más alto. Es un cambio en la tendencia de la curva atribuible al estancamiento del flujo cuando alcanza el cierre hacia la extracción de la fachada.

En los periodos de horas diurnas y cielo despejado, que es el caso de las horas ocho, diez, doce, catorce, dieciséis y dieciocho de la misma Figura 2.35, el sistema de control posiciona el caudal de extracción de la cámara ventilada en modo de alto caudal (200 l/s). Se tiene que la mayor ganancia térmica en el caudal de aire se produce en torno al primer metro y medio de altura. A partir de este punto ocurre un rápido decrecimiento en la ganancia térmica. A diferencia de los periodos de bajo caudal, el salto térmico es muy significativo. El mayor salto térmico coincide con el mayor nivel de incidencia de radiación sobre el mediodía solar, y se mantiene hasta la hora 14, con un aumento de la temperatura del aire extraído de la cámara respecto al exterior en torno a los +17 °C.

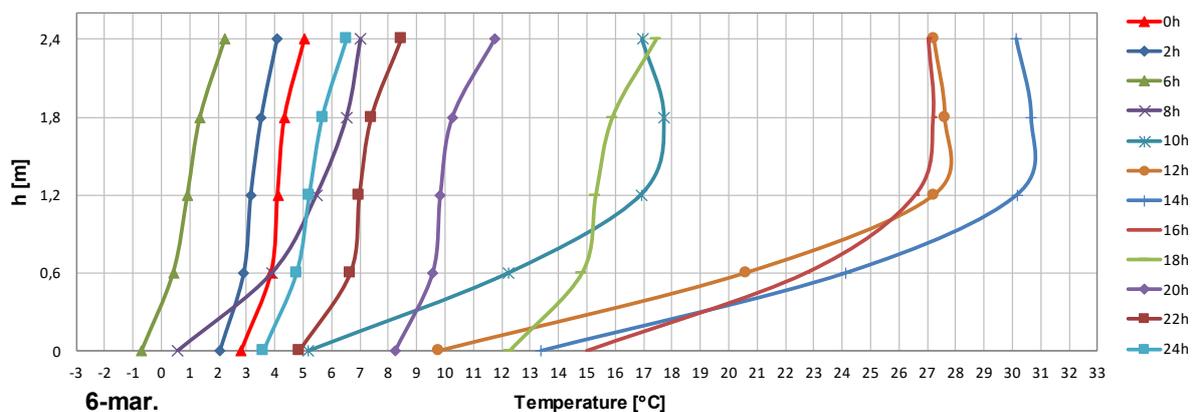


Figura 2.35 – Variación horaria de temperatura en altura para el eje central del caudal de aire en la cámara

En el modo de alto caudal de extracción, la zona de cierre superior de la fachada también se muestra como un punto singular. Particularmente, las lecturas indican enfriamiento del caudal. A priori puede pensarse que la condición de alto caudal en el flujo anula el calentamiento por estancamiento en la extracción. Sin embargo, análisis de otros días, en que la totalidad del día ha estado nublado y que por tanto la fachada funciona todo el tiempo en modo de bajo caudal, muestran que también ocurre este enfriamiento en la zona superior en las horas diurnas. Por tanto, hay más factores implicados en el cambio de tendencia en el comportamiento térmico del flujo de aire en cámara para la zona de extracción en la parte superior de la fachada. Un factor puede ser que en los periodos diurnos las condiciones ambientales faciliten la infiltración de aire exterior en las aberturas de separación de las placas superior. Otro puede deberse a que en periodos diurnos se acentúa la diferencia de temperaturas de la lámina de aire más caliente que asciende por detrás de la hoja fotovoltaica y la menos caliente que asciende por la superficie del aislamiento. La mezcla en la zona de extracción de estas dos corrientes a diferentes temperaturas da lugar a un valor intermedio de temperatura.

La hoja exterior de vidrios fotovoltaicos no es una capa continua, sino que tiene pequeñas aberturas horizontales del orden de 10 mm entre filas de módulos. A lo largo de los periodos de ensayo tanto en invierno como en verano, se han obtenido resultados térmicos semejantes ante condiciones térmicas interiores/exteriores semejantes. Esto indica que las infiltraciones de aire exterior a través de estas aberturas a lo alto de la fachada no producen un comportamiento errático relevante en su respuesta térmica.

2.3.2.5.2. Ganancia Térmica

La captación de energía en forma de calor se manifiesta como elevación de temperatura en el aire que cruza la cámara ventilada. Esta ganancia constituye la base del aprovechamiento de

la FVFF y su fuente energética es la radiación directa total vertical que incide en la fachada. Por tanto la valoración del rendimiento de la fachada en este aspecto se hace comparando la ganancia de calor con la radiación incidente en cada instante, tal y como se describe a continuación.

La energía total ganada por el flujo de aire debido a su calentamiento durante su paso por la cámara, queda determinada por la ecuación (2.6), expresada en términos de potencia instantánea.

$$\dot{Q}_{gain} = \dot{v} \cdot \rho_{air} \cdot c_{p,air} \cdot \Delta T_{air} \quad [W] \quad (2.6)$$

Donde $\dot{Q}_{gain} [W]$ es la potencia de ganancia térmica instantánea; $\dot{v} [m^3/s]$ es el caudal volumétrico; $\rho_{air} [kg/m^3]$ la densidad del aire; $c_{p,air} [J/kg \cdot K]$ la capacidad calorífica del aire y $\Delta T_{air} [K]$ la diferencia de temperatura en cada instante entre el aire extraído de cámara y el ambiente exterior. Como se ha dicho, la temperatura tomada como de salida del aire extraído de cámara es la medida en el punto más alto. La ecuación (2.7) determina la radiación solar global vertical incidente sobre la muestra $\dot{G}_v [W]$ expresada como el producto de la irradiación global vertical $G_v [W/m^2]$ multiplicado por la superficie de la muestra con vidrio fotovoltaico $A_{pv} [m^2]$. El área A_{pv} tiene un valor constante de $6.42 m^2$.

$$\dot{G}_v = G_v \cdot A_{pv} \quad [W] \quad (2.7)$$

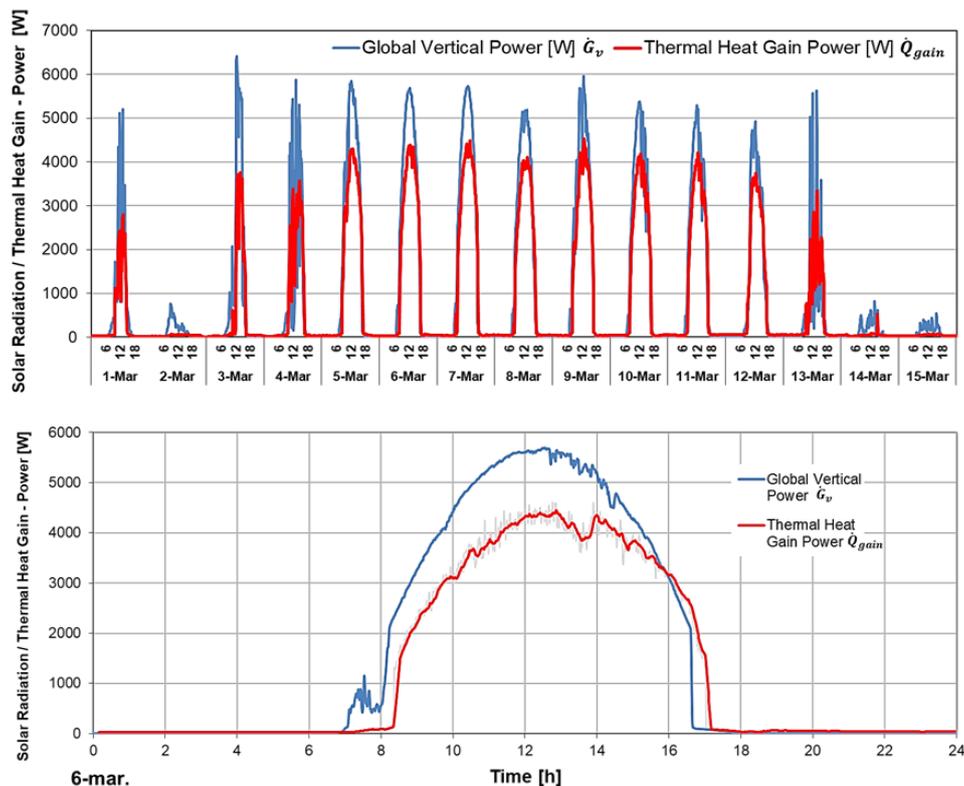


Figura 2.36 – Ganancia energética del caudal de aire en cámara durante el ensayo de invierno y comparación con la radiación incidente, expresadas en unidades de potencia instantánea (figura superior). Detalle de la misma comparativa en un día soleado (figura inferior)

La Figura 2.36 muestra la ganancia térmica del flujo de aire de la FVFF y la radiación solar incidente durante el ensayo de invierno, con ambas magnitudes expresadas en potencia instantánea.

Integrando ambas magnitudes en un periodo de 24 horas, se obtiene la correspondiente energía neta diaria, y el cociente de la ganancia térmica entre la energía incidente indica el rendimiento de la fachada como captador solar térmico.

En la Figura 2.37 se muestran estas tres cantidades para el ensayo de invierno: energía neta ganada por la fachada en forma de calor transferido al aire, energía neta incidente sobre la fachada en forma de radiación global vertical, y el rendimiento de la fachada como captador solar térmico.

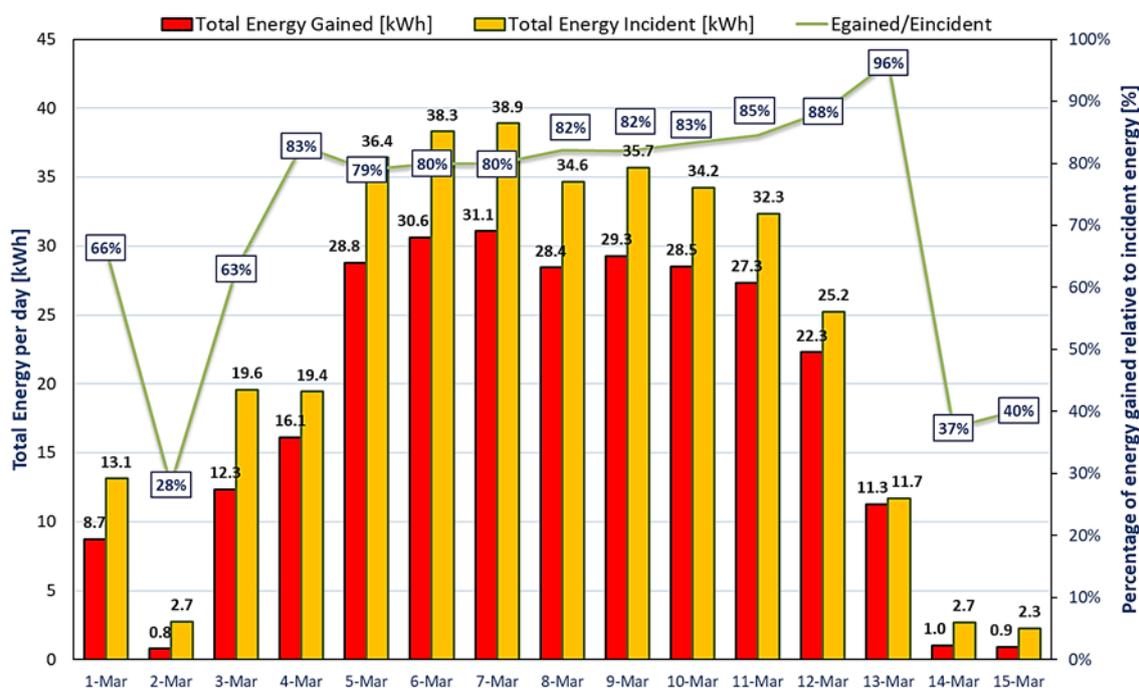


Figura 2.37 – Rendimiento diario de la FVFF como captador solar térmico.

La evolución de estas magnitudes en el ensayo de verano puede apreciarse en la Figura 2.38 y en la Figura 2.40.

La comparación entre la energía térmica ganada por el flujo de aire y la energía incidente para los días soleados, produce un rendimiento medio diario de 84% en invierno y de 94% en verano. Esto es un claro indicador del potencial energético de esta solución, mayor que los obtenidos en soluciones de doble fachadas fotovoltaicas semi transparentes[92].

Varios factores influyen en obtener tales rendimientos para la FVFF: el primero el uso de flujo forzado en la extracción, la disposición de la capa aislante justo en la cámara, el uso de vidrios fotovoltaicos de tipo opaco, etc. Por tanto el rendimiento obtenido no puede extrapolarse directamente a otras configuraciones de fachada ventilada fotovoltaica.

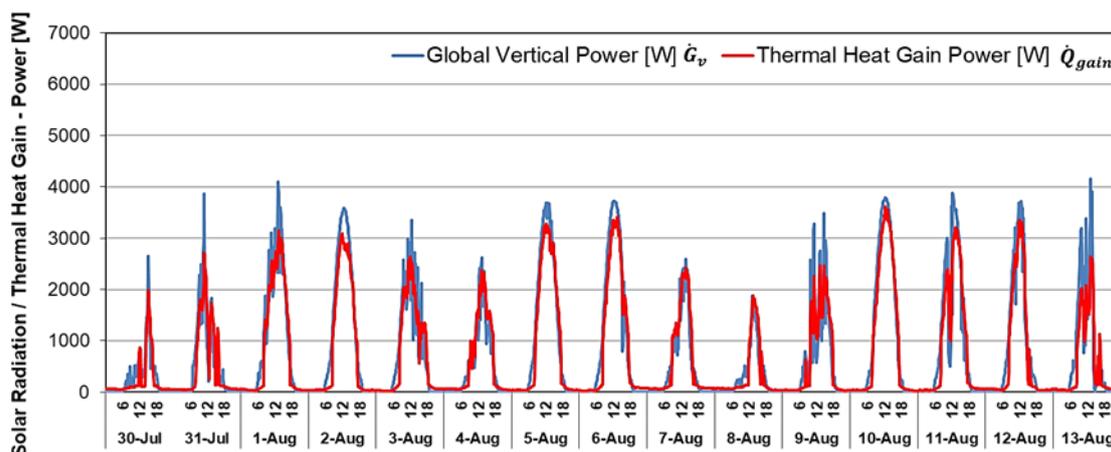


Figura 2.38 – Ganancia energética del caudal de aire en cámara durante el ensayo de verano y comparación con la radiación incidente, expresadas en unidades de potencia instantánea.

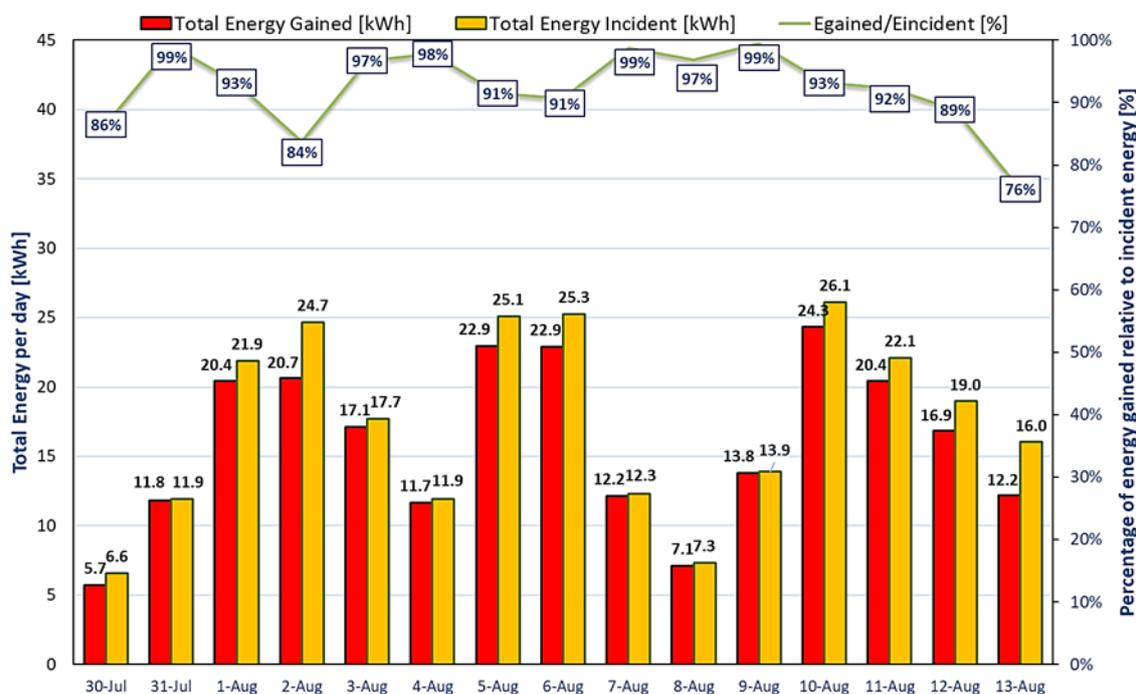


Figura 2.39 – Rendimiento diario de la FVFF como captador solar térmico.

2.3.2.6. Caudal y velocidades de aire en cámara

Las velocidades de aire registradas en invierno por los cuatro anemómetros en el interior de la cámara se pueden apreciar en la Figura 2.40.

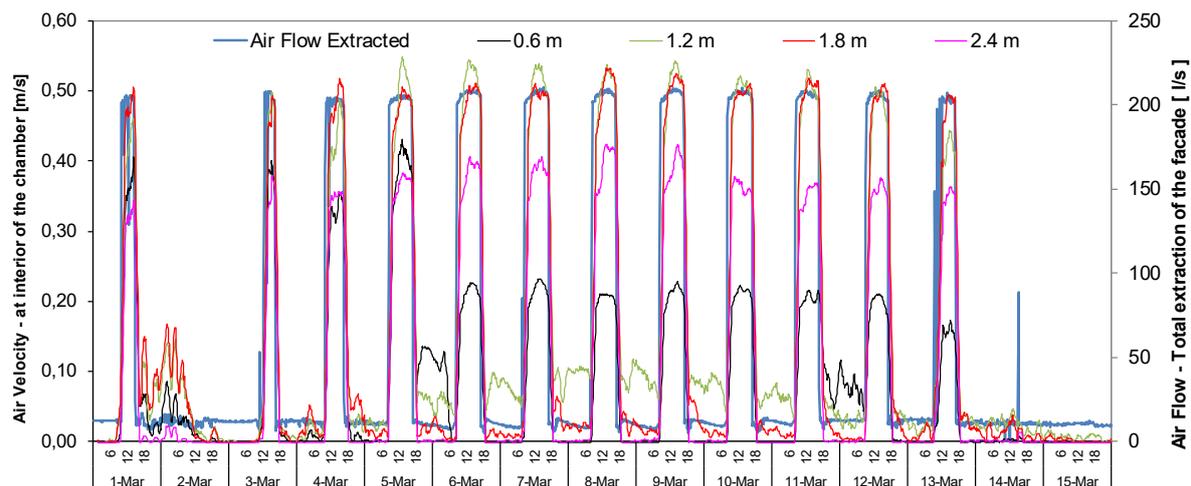


Figura 2.40 – Caudal de extracción y velocidades de aire a diferentes alturas en el interior de la cámara en invierno

El caudal de extracción de aire en cámara de 200 l/s produce velocidades de aire en la cámara en torno a los 0,5 m/s, tanto en el sensor a 1,2 m de altura, como en el ubicado a 1,8 m. Esto indica que el flujo interior a 1,2 m está desarrollado, y que la presencia de las aberturas horizontales entre filas de placas en la hoja exterior no impide la consecución de un flujo continuo a lo largo de la cámara.

El sensor ubicado a 2,4 m registra velocidades menores lo que indica que ha coincidido con una zona de estancamiento del flujo, como resultado de los cambios de geometría interior en la zona de conexión a los conductos de extracción.

Cada vez que la fachada opera en el modo de alto caudal de extracción en cámara, todos los sensores repiten su respuesta registrando velocidades en torno a los mismos niveles para cada cual. Solo ha habido alguna excepción en el caso del sensor más bajo, el que está a 0,6 m. Este ha mostrado ser el único con un cambio sensible durante los periodos de viento sur perpendicular a la fachada, en los que ha registrado mayores velocidades en comparación a otros días funcionando a alto caudal.

Las temperaturas en altura analizadas en el apartado anterior, mostraban un desarrollo del perfil de temperaturas tanto en bajo como en alto nivel de caudal. En cambio, en el caso de velocidades solo se aprecia un desarrollo cuando la fachada opera a alto caudal.

Las velocidades en cámara permiten concluir que cuando la fachada funciona en modo de ganancia térmica, con alto caudal de extracción y altas temperaturas en superficie, el flujo adquiere un régimen desarrollado en temperatura y velocidad a partir de media altura de fachada independiente de las condiciones de viento y a pesar de las aberturas horizontales entre placas.

Por otra parte, cuando la fachada opera en modo de caudal base en periodos nocturnos o de días nublados, el movimiento del aire en cámara es más aleatorio. Se comprueba que el caudal base no produce un flujo que sea continuo y desarrollado en velocidad dentro de la cámara de fachada. En días nublados o en periodos nocturnos y sin efecto del viento el movimiento del aire es mínimo. Existen periodos de movimiento por convección natural durante las noches en que el muro está transfiriendo calor debido a la excitación térmica del interior de la celda, con una respuesta dependiente del campo de temperatura más que de la acción del caudal base. En

todo caso, la temperatura de aire en cámara siempre es superior a la temperatura ambiente exterior, como se describe más adelante.

En la Figura 2.41 se muestran las velocidades obtenidas para las cuatro alturas monitorizadas en el interior de la cámara durante el ensayo en verano. Se comprueba que se obtiene un mismo orden de magnitud para la velocidad más alta en comparación al invierno. Sin embargo, a diferencia del invierno en que esta alta velocidad ya se conseguía desde la cota de 1,2 metros y se mantenía casi en el mismo valor en la cota de 1,8 metros, en verano tan solo ocurre en la cota de 1,8 metros. Debe tenerse en cuenta que en verano la intensidad de radiación incidente sobre la fachada es mucho menor, algo que influye en la intensidad con la que el flujo de aire realiza su proceso de ganancia térmica y su consecuente cambio en densidad.

Así mismo, en este periodo de verano, la velocidad registrada en la cota de 2,4 metros en los instantes de alto caudal dentro de la cámara de aire, se muestra equivalente a la registrada en invierno. Esto implica que el proceso de estancamiento del flujo en la zona de cierre hacia la extracción de la zona superior de fachada es semejante en las dos estaciones.

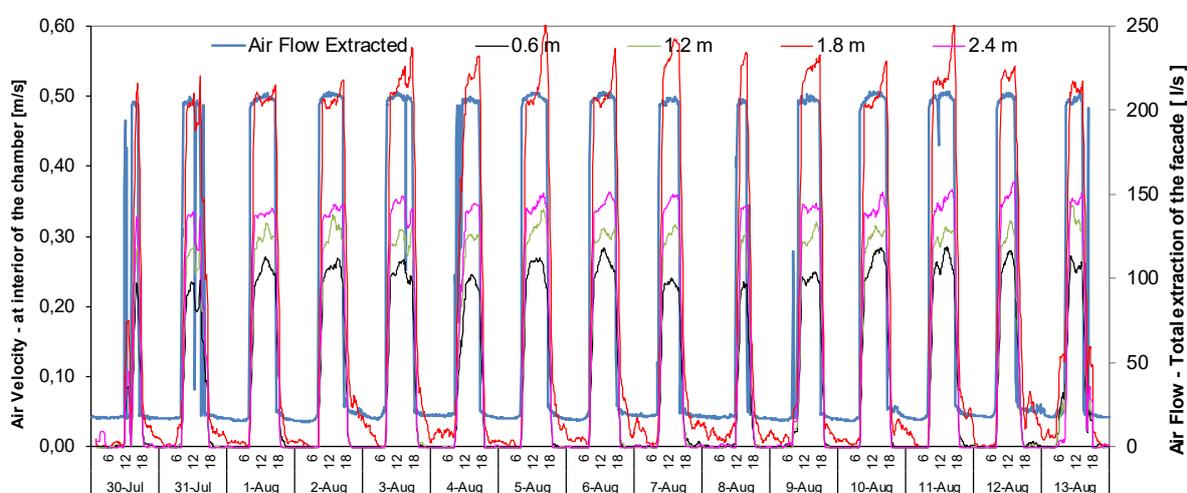


Figura 2.41 – Caudal de extracción y velocidades de aire a diferentes alturas en el interior de la cámara en verano

2.3.2.7. Generación eléctrica fotovoltaica

El comportamiento eléctrico diario de la hoja exterior formada por los módulos de vidrios fotovoltaicos se resume en la Figura 2.42. Se comprueba el mismo nivel de respuesta ante iguales condiciones de radiación incidente, como sucede en los días 5 a 7 de marzo. Para una radiación incidente entre 850 y 900 W/m², se generó un voltaje en torno a los 20 V y una intensidad en torno a 6 A (Figura 2.43).

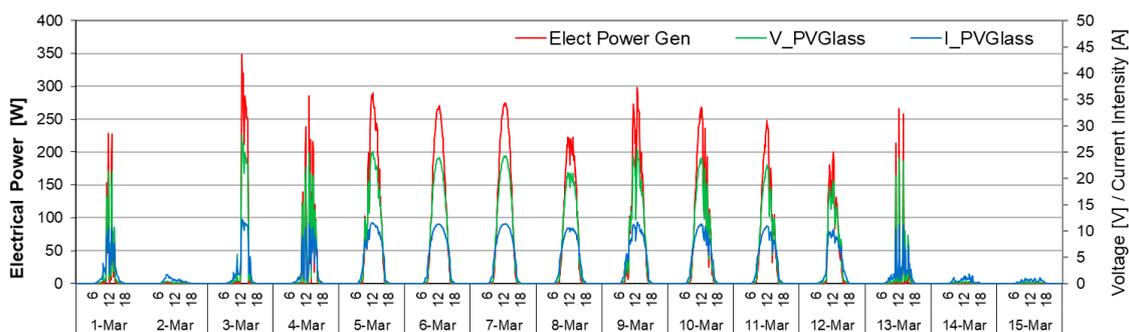


Figura 2.42 – Evolución horaria de las propiedades eléctricas de los vidrios fotovoltaicos durante el ensayo en marzo

Un aspecto importante en el ensayo era asegurar que la generación eléctrica instantánea por parte de la hoja fotovoltaica era igualmente consumida total e instantáneamente. De esta manera se aseguraba que la condición en que operaba la hoja exterior fotovoltaica desde el punto de vista de la disipación eléctrica era homogénea y se evitaba que tal aspecto se convirtiese en una variable más. Más adelante, en el capítulo de análisis a escala de edificio, se verá que una de las comprobaciones que se realizaron en los resultados del modelo de simulación del edificio fue que la fachada funcionara en forma similar que en el ensayo. Para ello se verificó que la totalidad de la electricidad generada instantáneamente es cubierta por el consumo, que en dicho modelo corresponde a la energía eléctrica que alimenta las bombas de calor.

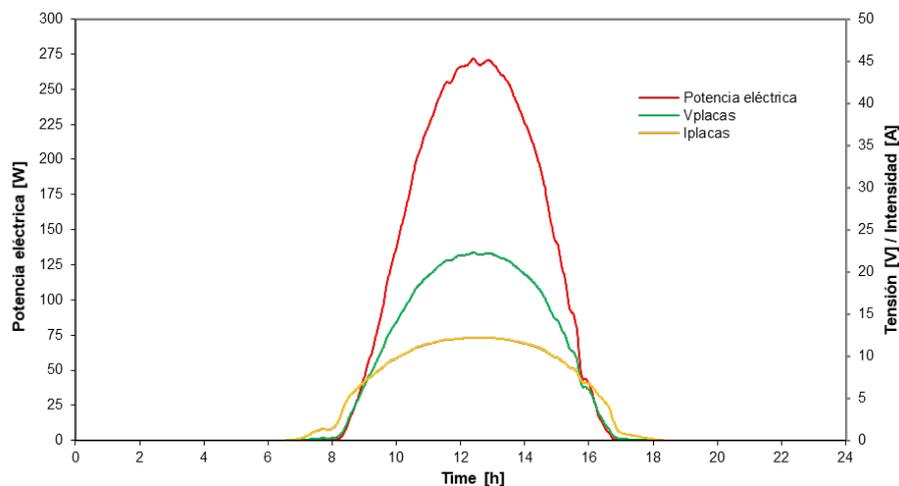


Figura 2.43 – Generación eléctrica de las placas fotovoltaicas opacas con extracción forzada de aire el 6 de marzo

Por su parte, durante el ensayo, el dispositivo físico dispuesto para disipar de forma instantánea la generación fotovoltaica fue la instalación de 10 bombillas en serie como se parecía en la Figura 2.44, compatibles con un circuito a 12 V en corriente continua. El modelo de bombilla empleada fue la halógena H7 U12V, con una potencia de disipación máxima de 55W cada una.



Figura 2.44 – Bombillas empleadas para la disipación de la energía producida por la fachada FVFF.

Los vidrios fotovoltaicos mostraron su idoneidad como elementos de calentamiento del aire en cámara, a la vista del resultado obtenido en la ganancia térmica. Sin embargo, desde el punto de vista de generación eléctrica mostraron un rendimiento bajo, a pesar del beneficioso efecto refrigerante que para el proceso fotoeléctrico tiene la existencia de un flujo forzado en cámara.

En la Figura 2.45 se muestra la generación total eléctrica diaria de los 6 módulos de vidrios fotovoltaicos durante el ensayo de invierno. Para cuantificar el rendimiento de esta generación se determina la energía específica generada en el día, expresada como la energía neta diaria por metro cuadrado de superficie de captación. De esta manera es posible hacer la comparación directa con la energía por radiación solar vertical incidente expresada en las mismas unidades. Esta comparativa se representa gráficamente en la Figura 2.46, en la que se establece que este sistema de vidrios fotovoltaicos posee un rendimiento eléctrico entre el 5 y 6 % en condiciones de máxima radiación.

Una de las cualidades más potentes del método de modelización de la muestra siguiendo el método PASLINK, es que ciertos fenómenos complejos pueden ser correctamente representados en una estructura sencilla de parámetros concentrados. Este ha sido el caso de todo el fenómeno fotoeléctrico que además es exotérmico, y que quedó recogido finalmente en la cuantificación del calentamiento del aire en cámara.

De cara al balance energético total a nivel de componentes eléctricas en el posterior análisis a escala de edificio, el rendimiento de generación eléctrica de los vidrios fotovoltaicos obtenido experimentalmente ha sido del 5%.

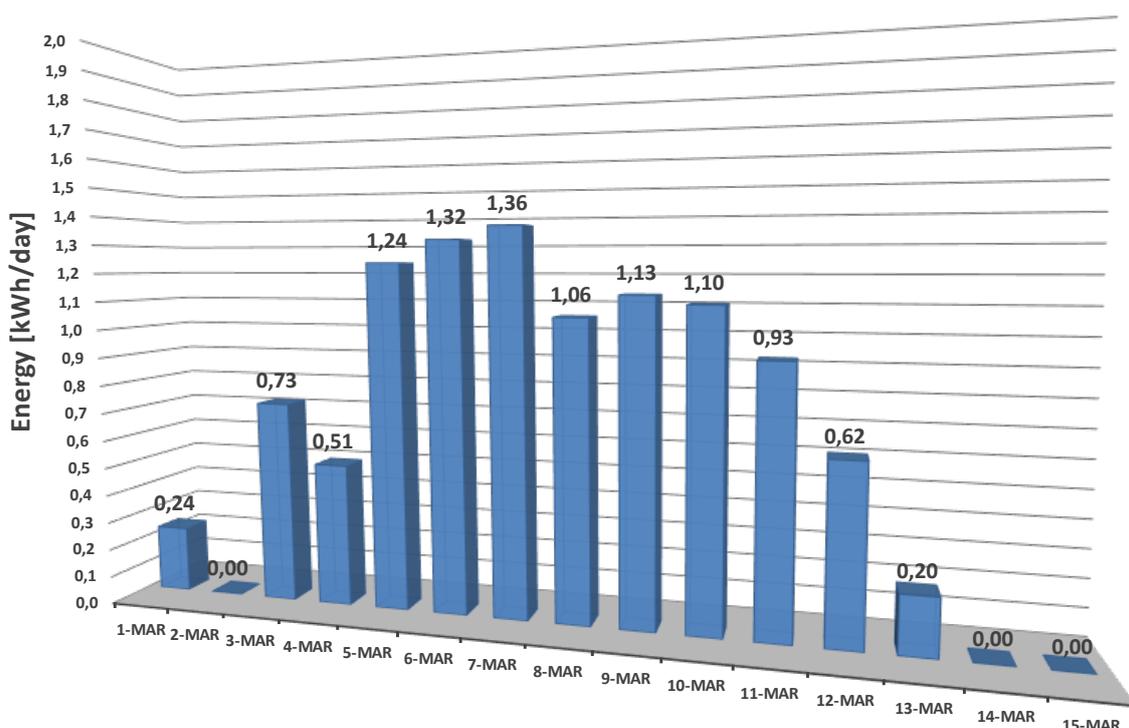


Figura 2.45 – Generación eléctrica diaria durante el ensayo en invierno (izq.) y verano (der.)

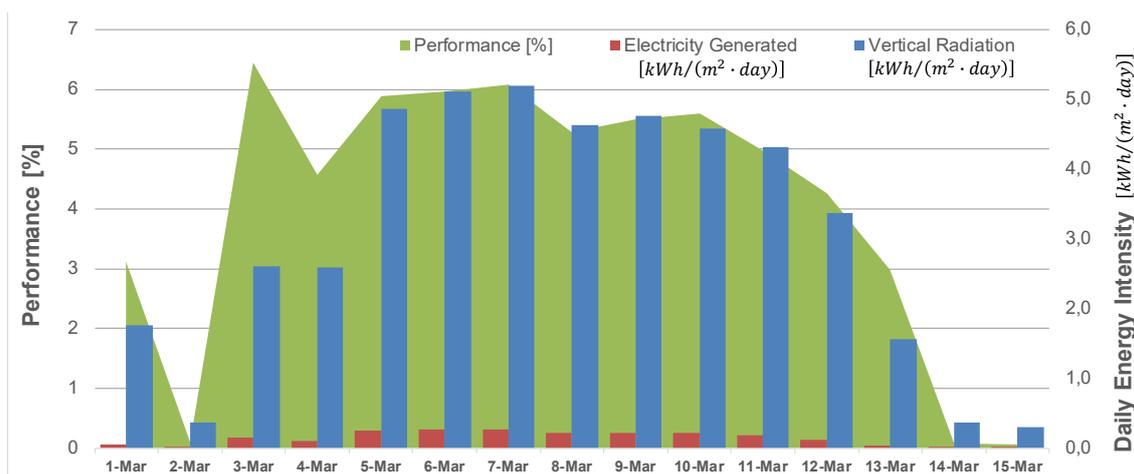


Figura 2.46 – Energía neta diaria producida por las placas fotovoltaicas, radiación solar vertical incidente neta diaria y rendimiento de los paneles opacos durante los días de ensayo

2.4. Conclusiones del capítulo.

La metodología PASLINK es una técnica altamente confiable para la caracterización térmica de componentes de la edificación en condiciones reales exteriores, tal y como lo demuestran los ensayos de intercomparación efectuados durante su desarrollo.

El factor de calibración total de la célula EGUZKI determinado con el método estándar del método de ensayo PASLINK, indica que la incertidumbre en la medida del flujo de calor que cruza la envolvente de la célula a través de las HFS-Tiles es del 13%. Este valor es un indicador de la gran calidad de la célula EGUZKI. Sin embargo, el uso de factores de corrección dinámicos demostró que esta célula correctamente construida e instrumentada podía mejorar aún más su incertidumbre, reduciéndola a un 6%.

El método de coeficientes de igualación propuesto se basa en una combinación de lecturas de los sensores de flujo de calor adicionales instalados en las Multi-Tiles, acompañado de una simulación por elementos finitos de los bordes de la célula. La determinación de dichos coeficientes se hace tan solo una única vez aprovechando el ensayo de calibración y pasan a formar parte de las herramientas de tratamiento de datos de la célula.

Los factores dinámicos para la corrección del efecto de borde han demostrado tener cualidades adaptativas a la señal que los determina, que viene a ser el propio flujo de calor en el borde que buscan corregir. Esto quedó evidenciado por el ajuste obtenido en las distintas secuencias de excitación térmica del ensayo de calibración. Se obtuvo que en los instantes de alta potencia de calefacción los factores dinámicos hacían un ajuste amplificado reduciendo la separación de la señal de las tiles respecto de la calefacción. Por el contrario, en los instantes de baja potencia de calefacción, el factor se reduce causando menor distorsión en el valor de las HFS-Tiles que si se mantuviese constante. En el caso de los bordes en la cara sur, esta capacidad de adaptación reduce la sobreestimación que causaría un factor de corrección constante correspondiente al muro de calibración, la muestra más aislante posible.

El método de coeficientes de igualación desarrollado para la mejora en la incertidumbre del equipo experimental empleado para esta tesis, ha demostrado su capacidad de ser una técnica más objetiva, imparcial y confiable que las recomendaciones de las guías y manuales PASLINK y la literatura en general, para definir los factores de corrección del efecto de borde

Los perfiles de variación con la altura para la velocidad y la temperatura del flujo de aire dentro de la cámara de fachada han servido para establecer los efectos sobre este flujo de las regiones de entrada, de ascenso y de extracción. Con base en las lecturas registradas por los sensores entre las cotas de 1,2 m a 1,8 m, se estableció que en condiciones de alto caudal de extracción el flujo en la cámara de fachada conseguía entrar en zona de flujo desarrollado, tanto en temperatura como en velocidad.

La zona superior de extracción afecta la tendencia de desarrollo que alcanza el flujo de aire en cámara debido a un efecto de estancamiento, que en términos de temperatura se manifiesta como un leve cambio en la tendencia del perfil de temperatura. En los periodos diurnos este leve cambio siempre fue de enfriamiento, independientemente de que el caudal estuviese en nivel bajo o alto.

La temperatura del flujo de aire en cámara medida en el punto inferior cerca de la entrada, y la medida en el punto superior de la zona de extracción y estancamiento, son inferiores a la temperatura de flujo desarrollado. Esto implica que la temperatura media obtenida con los cuatro puntos medidos en altura dentro de la cámara, sea un valor conservativo respecto al valor que alcanza en la zona de flujo desarrollado. El uso de esta temperatura media como temperatura de referencia para estimar el salto térmico del caudal de aire, implica que dicha estimación también sea conservativa.

La fachada FVFF fue configurada como un dispositivo que se adapta para tener la mayor capacidad de captación térmica en los instantes soleados, operando a un alto caudal de extracción de 200 l/s, mientras que se posiciona a un bajo caudal de 10 l/s en instantes nublados. Esta forma de operación ha demostrado un potencial de captación solar térmico muy eficiente, pues se aprovecha los instantes de mayor disponibilidad en la fuente de calor para calentar la mayor cantidad de masa de aire posible, que actúa como acumulador. Se obtiene una capacidad de captación de al menos un 80%.

La fase experimental ha demostrado la viabilidad de la solución FVFF como un eficiente captador de energía solar térmica. El reto de transportar esta ganancia energética al edificio constituye el tema de trabajo de los siguientes capítulos.

CAPITULO 3

Modelo para determinar la temperatura en la cámara de la FVFF

RESUMEN

Este tercer capítulo describe el proceso de obtención, ajuste y validación de un modelo numérico que combina la discretización de diferencias finitas con componentes de un modelo RC derivado de los datos experimentales. Este modelo RC previo es solucionado mediante técnicas de identificación de parámetros concentrados de la metodología PASLINK. El modelo numérico tiene por objetivo determinar la ganancia de temperatura del flujo de aire en su paso por la cámara de la FVFF. Algunos fenómenos observados en la etapa experimental han sido básicos para orientar el proceso de ajuste del modelo, en especial los escenarios de operación en los que el modelo debía autorregularse. El modelo producto de este capítulo sirve de puente para conectar la caracterización experimental del capítulo dos con el análisis a escala de edificio del capítulo cuatro.

3.1. Introducción.

La estructura final del modelo térmico de la FVFF es el resultado de un proceso paulatino y acumulativo. Antes de proceder a la exposición del modelo y descripción detallada de su estructura se hace una breve descripción de las alternativas de modelamiento disponibles, destacando las ventajas de la técnica de identificación de parámetros y del software LORD que son las herramientas fundamentales de análisis en los ensayos bajo el método PASLINK.

A partir de los datos experimentales, la herramienta LORD ajusta un modelo tipo RC que representa la sección de la muestra de fachada FVFF ensayada. Un apartado resume los resultados del modelo de parámetros concentrados así solucionado, seguido de una descripción detallada de las consideraciones tenidas en cuenta para el planteamiento del propio modelo RC, así como la discusión de algunos de los resultados.

El modelo de parámetros concentrados posteriormente es convertido a un modelo numérico más genérico. Este modelo numérico combina la discretización usada por las técnicas de diferencia finitas con componentes determinados mediante el ajuste LORD. De esta forma el modelo numérico cuenta con una serie de nodos adicionales para describir las temperaturas en el interior de la fachada. Así que se hace una descripción detallada de las ecuaciones que permiten determinar cada uno de los nodos que forman el modelo, deducidas a partir de balances de flujo de calor.

El diseño de fachada FVFF propuesto en este estudio, y que como tal fue caracterizado en la etapa experimental, tiene la capacidad de variar su caudal de extracción del aire de la cámara ventilada en función de las condiciones de “ganancia térmica” de la fachada. La herramienta LORD realizó el ajuste del modelo RC de forma individual para aquellos conjuntos de datos correspondientes a modos de funcionamiento diferentes: bajo caudal, alto caudal, soleado, y nublado/nocturno. En cambio, el modelo numérico debía tener la capacidad de autorregularse para definir el nivel de caudal de la fachada en función de las condiciones de temperatura y radiación exterior. Esta capacidad de autorregulación fue hecha mediante funciones de ajuste sigmoide de Boltzmann, diferenciadas para invierno y para verano y cuya determinación es descrita en detalle.

La coherencia en el planteamiento del modelo numérico es demostrada mediante la estructuración del mismo en un algoritmo lógico de programación, que puede ser traducido a cualquier lenguaje de programación o herramienta informática de cálculo.

Finalmente se muestra la comparativa entre los datos experimentales y los obtenidos del modelo numérico al usar como datos de entrada las condiciones exteriores registradas durante el ensayo. Esta comparativa busca validar el modelo numérico desarrollado, con base en los valores de temperatura en las diferentes capas de la sección de fachada y de velocidades del aire en la cámara ventilada.

3.2. Selección del tipo de modelo.

3.2.1. Clases de modelos

Las alternativas para modelar el comportamiento térmico de elementos de la edificación pueden clasificarse a grandes rasgos en tres grupos principales:

- a) Modelos de caja negra: También conocidos como modelos basados en datos (“*data-driven*”), se suelen utilizar cuando la información conocida del sistema a modelar es limitada. El sistema a modelar puede tratarse de un elemento en particular o del edificio entero[137][138]. El modelo se limita a la generación de unos datos de salida en función de los datos de entrada (Figura 3.1). Normalmente los datos son correlacionados mediante transformaciones matemáticas como las de las funciones de transferencia que no necesariamente contemplan las interdependencias físicas entre estos. La correlación entre las variables de entrada y de salida se consigue a partir de un conjunto inicial de valores conocidos. Su uso como herramienta de cálculo queda limitada a que los nuevos datos de entrada ocurran en el mismo contexto en que fue determinada la correlación, sin garantizar su fiabilidad para otros escenarios.



Figura 3.1– Representación esquemática de un modelo de caja negra.

- b) Modelos de caja gris: son una combinación de modelos dinámicos basados en el conocimiento de la física del sistema con componentes basados en datos. Consiste en plantear un modelo físico simplificado que representa la dinámica del sistema por analogía eléctrica, con redes de resistencias-capacitancias para cada una de las vías de transferencia de calor (Figura 3.2).

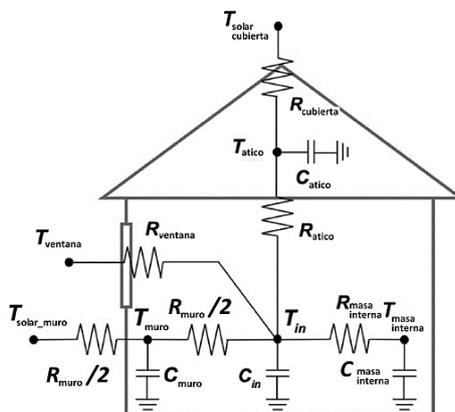


Figura 3.2 – Ejemplo de un modelo térmico de caja gris para una vivienda, adaptado de [139].

Los parámetros que componen un modelo de caja gris son determinados a partir de los datos medidos por medio de métodos estadísticos y teniendo en cuenta el ruido y los

errores de medición. Son ampliamente utilizados cuando se dispone de un importante conjunto de datos medidos en campo o en laboratorio[140][139], aunque también hay estudios en los que el universo de datos que alimentan al modelo de caja gris provienen de escenarios virtuales[141].

La técnica de caja gris es usada en infinidad de estudios de caracterización térmica porque ofrece un importante compromiso entre practicidad y precisión. Por ejemplo, en la Figura 3.3 se muestra el aumento del nivel de detalle del modelo de caja gris para representar una vivienda en el estudio hecho por Reynders[141]; en este estudio se quería identificar cuál sería el orden mínimo recomendable para integrarlo en una red mayor. Como se aprecia en la figura, el orden del modelo se asocia al número de ramales que conforman el circuito.

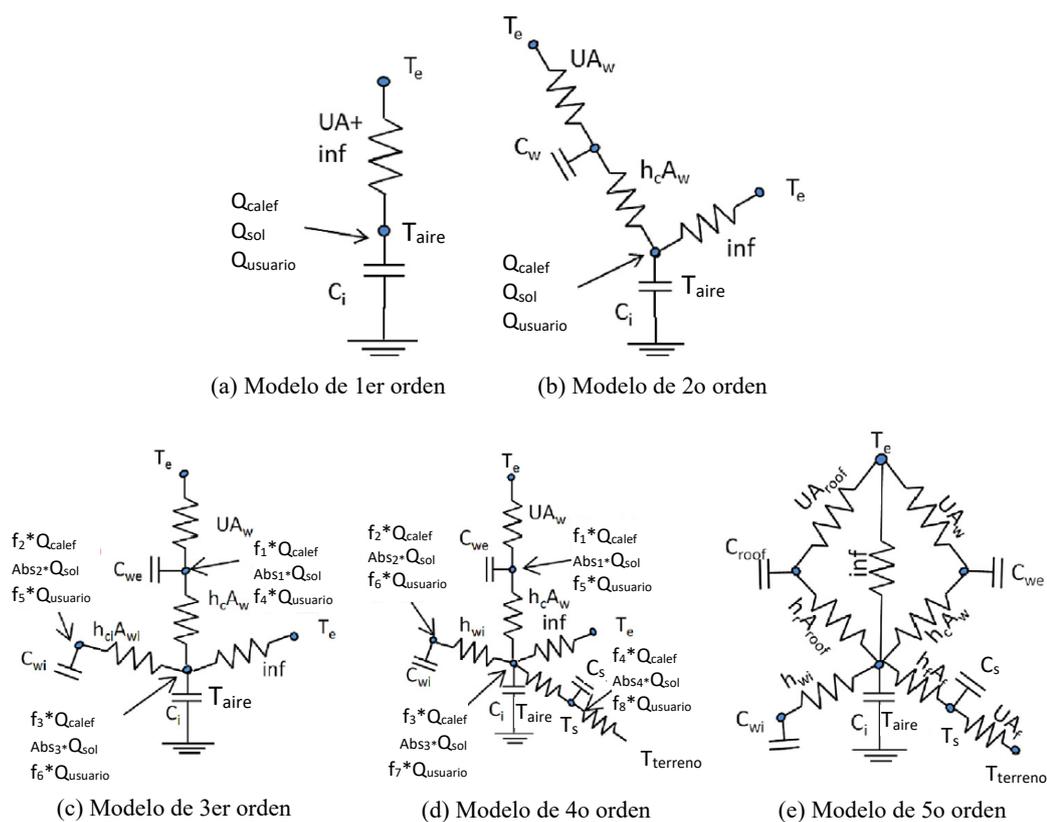


Figura 3.3 – Ejemplo de aumento del detalle en un modelo de caja gris de edificio, adaptado de [141].

La técnica para resolver modelos de caja gris, también es conocida como de “identificación de parámetros”. En el posterior apartado de descripción del modelo, se expone esta técnica de forma detallada.

- c) Modelos de caja blanca (deterministas): en estos modelos los fenómenos térmicos se simulan directamente a partir de sus ecuaciones físicas. Son la base de los softwares de simulación energética de edificios conocidos como BES (Building Energy Simulation)[142]. También están los paquetes de cálculo por elementos finitos, con aplicaciones mucho más globales pero que pueden emplearse en ciertos estudios en la edificación. Este es el caso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que suele emplearse para fenómenos de transferencia de calor tanto en elementos opacos y

semitransparentes como en el movimiento del aire. Los modelos deterministas también son denominados modelos de caja blanca (“white-box”) incluso cuando su base de cálculo consiste en versiones simplificadas de las ecuaciones físicas.

Además de tener una significativa exigencia computacional, los modelos deterministas también suelen ser exigentes en la definición de los datos de entrada, requiriendo mucha información de las propiedades termofísicas de los componentes del elemento a analizar. Esto puede afectar sensiblemente la exactitud de las estimaciones, y es habitual que el usuario o que el modelo en sí mismo aplique valores típicos “por defecto” a una gran cantidad de parámetros de entrada.

3.2.2. Técnica seleccionada

El modelo de caracterización de la FVFF realizado ha sido del tipo de caja gris, empleando técnicas de identificación de parámetros. En esta selección han influido, entre otras las siguientes consideraciones:

- Se dispone de un conjunto abundante y significativo de datos experimentales recopilados durante el ensayo PASLINK, con el rigor y control de incertidumbre que esta técnica implica.
- El modelo a desarrollar debe tener una exigencia computacional ligera, abordable por una herramienta de cálculo para estimar el comportamiento de la fachada para un año entero, en pasos de tiempo diez minutos.
- El modelo debe tener una fiabilidad contrastada. En este sentido, se cuenta con la ventaja de tener datos experimentales en condiciones de invierno y de verano, y de que las condiciones de ejecución del ensayo presentan una gran variabilidad. Si el modelo es capaz de representar tal variabilidad, quedará comprobada su potencialidad de aplicación. Cabe resaltar aquí, que para que el modelo sea capaz de abordar las diferentes posibilidades de operación de la fachada, este tiene que ser “autorregulable”. Esto quiere decir, que ajuste los niveles de caudal en cámara de fachada de forma automática en función de las condiciones climáticas establecidas por los datos de entrada.
- La experiencia y destrezas desarrolladas en la técnica de identificación de parámetros en el día a día de la ejecución de ensayos PASLINK.

3.3. Proceso de obtención del modelo

La estructura final del modelo térmico de la FVFF es el resultado de un proceso paulatino y acumulativo. Es un modelo RC de tipo caja gris que representa de forma global la fachada entera, pero que se ha definido lo más sencillo posible. El proceso de determinación de sus componentes está basado en el uso del programa LORD.

Una vez que se han obtenido los diferentes parámetros que ajustan el modelo LORD a los datos experimentales, este ha sido reconvertido a un modelo numérico que pudiese ser implementado en cualquier herramienta de cálculo. De esta forma el modelo se convierte en un

instrumento que permite predecir las temperaturas de la fachada FVFF para cualquier localidad, tomando como datos de entrada tres variables fácilmente determinables: la temperatura ambiente definida para el interior, la temperatura ambiente exterior local y la radiación vertical local incidente sobre la fachada en función de su orientación.

Tres componentes del modelo requirieron un tratamiento particular para que pudiese ajustarse satisfactoriamente a toda condición de operación:

- La representación en el modelo de la hoja exterior fotovoltaica,
- Los fenómenos de transferencia de calor en cámara, tanto por radiación como por convección,
- El efecto del cambio en niveles de caudal.

A continuación, se expone este proceso, así como las consideraciones y criterios que dieron forma a cada parte del modelo.

3.3.1. Herramientas PASLINK para la identificación de parámetros

La identificación de sistemas es una disciplina muy desarrollada y aplicada en infinidad de campos, pues tiene la capacidad de obtener modelos ajustados a los propósitos de la simulación. En el caso de los elementos de la edificación que han sido ensayados en condiciones exteriores, el uso de esta técnica permite estimar los parámetros físicos que los caracterizan como un sistema dinámico. Se trata de una técnica resultante de la combinación entre las poderosas capacidades de una herramienta estadística y la utilidad de un modelo con interpretación física[143].

Desde el punto de vista de la identificación de parámetros, es necesario que los datos experimentales tengan una variabilidad tal que el modelo disponga de la suficiente información para estimar cuantos parámetros hagan falta con una incertidumbre baja. Por ello es importante que el sistema haya sido correctamente excitado durante la fase experimental. Así mismo, los datos que serán usados como variables de entrada deben tener calidad de medida, para evitar que presenten un ruido tan significativo que dificulten el ajuste del modelo hasta hacerlo fallar.

La técnica de identificación empleada para los ensayos PASLINK se basa en un modelo de caja gris, que conecta un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias y continuas en el tiempo con un conjunto de datos de mediciones obtenidos en tiempo discreto, empleando un modelo de parámetros concentrados RC.

Diversos proyectos Europeos dieron lugar al desarrollo de la metodología PASLINK [105][144][145], y en varios de ellos se dedicaron esfuerzos a la obtención de herramientas optimizadas para la identificación de parámetros aplicada a ensayos en régimen dinámico. Durante la etapa de la red PASLINK EEIG [146][147], se realizó una competición oficial denominada “System Identification Competition” [143][148] que derivó en la obtención de dos herramientas especialmente desarrolladas para el ajuste de modelos RC: una denominada LORD (LOGical R-Determination) [149] desarrollada por la propia red PASLINK a partir del paquete MRQT [150], y la herramienta CTSM (Continuous Time Stochastic Modelling) [151][152] desarrollada en la Technical University of Denmark DTU.

La Figura 3.4 muestra la configuración base de un modelo de parámetros concentrados, cuyo balance de flujo de energía para el nodo con temperatura T_i , está dado por los términos de la ecuación (3.1) determinados a partir del proceso físico de transmisión de calor.

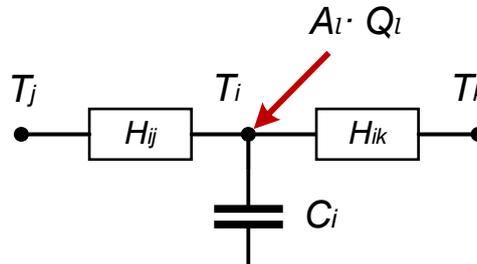


Figura 3.4 – Modelo base de parámetros concentrados para la transmisión de calor en un cerramiento.

$$C_i \frac{dT_i(t)}{dt} = \sum_j H_{ij} \cdot T_j(t) + \sum_k H_{ik} \cdot T_k(t) + \sum_l A_{il} \cdot Q_l(t) \quad (3.1)$$

Donde: C_i : capacidad térmica del nodo i ; H_{ij} : conductancia entre el nodo i y un nodo interno j ; H_{ik} : conductancia entre el nodo i y un nodo externo k ; A_{il} : Fracción del flujo de calor Q_l que fluye al circuito a través del nodo i .

Los balances de todos los nodos que forman el modelo, dan lugar a un conjunto de ecuaciones que pueden ordenarse en el arreglo matricial indicado por la ecuación (3.2), dando lugar a un caso particular de modelos de espacio de estados

$$\begin{aligned} \{dT\} &= [A]\{T\}dt + [B]\{U\}dt \\ \{Y\} &= [C]\{T\} + [D]\{U\} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Donde: $\{T\}$ es el vector de estado, formado por las temperaturas en cada nodo; $[A]$ es la matriz dinámica del sistema que contiene las propiedades térmicas del modelo; $[B]$ es la matriz de comando que define en qué medida las excitaciones afectan al modelo; $\{U\}$ es el vector de entradas, formado por las variables de excitación tales como temperaturas de aire, radiación solar, etc.; $\{Y\}$ es el vector de medidas, formado por las variables objetivo que se registran, normalmente temperaturas y flujos superficiales; $[C]$ es la matriz de observaciones que relaciona las variables medidas con las variables de estado; $[D]$ es la matriz de acoplamiento directo que relaciona las variables medidas con las variables de entrada.

Para resolver este modelo, el software LORD requiere definir tres aspectos:

- Primero, discretizar la variable tiempo, dado que los datos experimentales se obtienen en tiempo discreto;

- Segundo, debe definirse la (o las) función objetivo cuya minimización de diferencia entre valor medido y valor modelizado permitirá estimar el resto de parámetros del modelo;
- Tercero, seleccionar el algoritmo de minimización tal que asegure la obtención del mínimo global, salvando posibles mínimos locales.

CTSM también considera estos aspectos, pero con otro enfoque. A continuación, se describe con un poco más de detalle este proceso.

LORD discretiza la variable tiempo, aproximando a diferencias finitas las derivadas temporales como se indica en la ecuación (3.3), de forma que el modelo queda representado por el sistema de ecuaciones lineales de la ecuación (3.4).

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \{\mathbf{T}(t)\} - \{\mathbf{T}(t - \Delta t)\} &= [\mathbf{A}]\{\mathbf{T}(t)\}\Delta t + [\mathbf{B}]\{\mathbf{U}(t)\}\Delta t \\ \{\mathbf{Y}(t)\} &= [\mathbf{C}]\{\mathbf{T}(t)\} + [\mathbf{D}]\{\mathbf{U}(t) + \mathbf{T}(t - \Delta t)\} \end{aligned} \quad (3.4)$$

La función objetivo a evaluar se construye como N , el cuadrado de la diferencia entre los valores medidos y los valores calculados de uno (o de varios) de los datos monitorizados Y , ecuación (3.5), calculado para cada una de las mediciones de las variables de entrada registradas durante el intervalo i , siendo n el número total de medidas disponibles. Esta función a su vez depende del valor de cada uno de los parámetros θ que forman el modelo de parámetros concentrados: todas las capacitancias térmicas C_i , las conductancias térmicas H_j , y las aperturas de flujos de calor g_k .

$$\begin{aligned} N(\theta) &= \sum_{i=1}^n (Y_{med,i} - Y_{calc,i})^2 \\ \theta &= (C_i, H_j, g_k) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Los parámetros óptimos del modelo serán los que minimizan esta función objetivo, y se tienen dos métodos para su solución. Cuando la desviación entre los valores medidos y los valores calculados por el modelo son determinada una vez evaluado todo el conjunto completo de datos de trabajo en el ensayo, ecuación (3.6), se denomina OEM (Output Error Method). Si por el contrario los parámetros se obtienen a través de la minimización del cuadrado de los errores predichos por la ecuación (3.7), se denomina PEM (Prediction Error Method). En esta expresión, $\hat{Y}_{t/t-1}(\theta)$ denota una predicción de Y_t dados los datos hasta el tiempo $(t - 1)$ inclusive, basado en el vector de datos de prueba θ , con lo que $\varepsilon(\theta)$ es el error definido como residual en cada paso de la iteración a través de dicho vector. El método PEM es más avanzado que el OEM pues contempla variabilidades estocásticas del modelo y de las funciones de excitación, y aporta más herramientas de validación del modelo final, como el análisis de correlación de residuos.

$$[\theta]_{opt} = arg \min_{\theta} \sum_{i=1}^n (Y_{med} - Y_{calc})^2 \quad (3.6)$$

$$\varepsilon(t, \theta) = (Y_t - \hat{Y}_{t/t-1}(\theta))^2 \quad (3.7)$$

En cuanto a los algoritmos para detectar el error mínimo en la función objetivo, el software LORD cuenta con dos métodos: el “*Downhill Simplex Method*” y el “*Montecarlo Procedure*”. Estos dos métodos se usan de forma alterna. Primero el método Downhill Simplex evalúa la función objetivo para buscar un mínimo, empleando recursos geométricos por lo que no requiere el uso de derivadas de dicha función. Segundo, el método Montecarlo genera valores aleatorios que rodean al mínimo, en búsqueda de valores inferiores de la función objetivo. En caso de detectar un nuevo valor mínimo, se vuelve a aplicar el método Downhill Simplex. Este mecanismo de búsqueda permite evitar posibles mínimos locales, y obtener con mayor fiabilidad el mínimo global de la función objetivo. Mayor detalle del desarrollo matemático de LORD y su uso en la caracterización de edificios puede consultarse en [149][148].

Por su parte el CSTM transforma el modelo determinista en un modelo estocástico se indica en la ecuación (3.8), para subsanar deficiencias que pueden estar originadas por causas tales como el impacto de las hipótesis de simplificación al plantear el modelo, variables no contempladas y que afectan el modelo (radiación de onda larga, viento, etc.) o el ruido de medida inherente a los sensores que proporcionan los valores experimentales.

$$\{d\mathbf{T}\} = [\mathbf{A}]\{\mathbf{T}\}dt + [\mathbf{B}]\{\mathbf{U}\}dt + d\omega(t) \quad (3.8)$$

$$\{\mathbf{Y}\} = [\mathbf{C}]\{\mathbf{T}\} + [\mathbf{D}]\{\mathbf{U}\} + \mathbf{e}(t)$$

Donde el término aleatorio $d\omega(t)$ sigue un proceso Weiner con incrementos independientes de covarianza $\sigma_1^C(t)$, y el término $\mathbf{e}(t)$ sigue una distribución normal de ruido blanco con media cero y varianza σ_2 . Se asume la hipótesis que $\omega(t)$ y $\mathbf{e}(t)$ son mutuamente independientes y, por tanto, no están correlacionados.

El proceso de discretización en CSTM se realiza mediante la resolución analítica de la ecuación (3.8), produciendo la ecuación (3.9), expresada en forma compacta.

$$\mathbf{T}(t + \tau) = \phi(\tau)\mathbf{T}(t) + \Gamma(\tau)\mathbf{U}(t) + \mathbf{v}(t, \tau) \quad (3.9)$$

Donde se ha simplificado la notación mediante las siguientes sustituciones: $\tau = t + \Delta t$; $r = t + \tau - s$; $\phi(\tau) = e^{A\tau}$; $\Gamma(\tau) = \int_0^\tau e^{Ar} \mathbf{B} dr$; y finalmente $\mathbf{v}(t, \tau) = \int_t^{t+\tau} e^{A(T+\tau-S)} d\omega(s)$.

En CSTM la función objetivo a evaluar no se basa en una diferencia entre valores medidos y calculados, sino que se basa en una función de probabilidad condicional, indicada por la ecuación (3.10).

$$L(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{Y}(n)) = p(\mathbf{Y}(n)|\boldsymbol{\theta}) = \left(\prod_{i=1}^n p(\mathbf{Y}(i)|\mathbf{Y}(i-1), \boldsymbol{\theta}) \right) p(\mathbf{Y}(0)|\boldsymbol{\theta}) \quad (3.10)$$

La función objetivo de probabilidad se obtiene de aplicar de forma recursiva la regla básica de probabilidad condicional $P(A \cap B) = P(A/B)P(B)$, tantas veces como datos medidos, n , se disponen, formando así una función de densidad condicional para un vector concreto $\boldsymbol{\theta}$. En este caso, el vector óptimo de parámetros se busca como aquel vector que genera una respuesta del sistema que, con mayor probabilidad, se ajusta a los valores medidos (ecuación (3.11)).

$$[\boldsymbol{\theta}]_{opt} = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}} \{L(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{Y}(n))\} \quad (3.11)$$

Como los dos términos aleatorios añadidos $v(t)$ y $e(t)$ siguen una distribución normal, la función de densidad condicional sigue también una distribución normal, que puede caracterizarse directamente por su valor medio condicional (ecuación (3.12)) y su varianza condicional (ecuación (3.13)).

$$\hat{\mathbf{Y}}(i|i-1) = E(\mathbf{Y}(i)|\mathbf{Y}(i-1), \boldsymbol{\theta}) \quad (3.12)$$

$$\mathbf{S}(i|i-1) = V(\mathbf{Y}(i)|\mathbf{Y}(i-1), \boldsymbol{\theta}) \quad (3.13)$$

Además, también hay una evaluación del error en cada intervalo de tiempo discretizado, mediante la expresión de la ecuación (3.14), siendo una estimación de tipo PEM.

$$\boldsymbol{\varepsilon}(i) = \mathbf{Y}(i) - \hat{\mathbf{Y}}(i|i-1) \quad (3.14)$$

En la determinación del modelo matemático que caracteriza la FVFF, solo se ha empleado la herramienta LORD.

3.3.2. Modelo RC

La FVFF es representada por el modelo de la Figura 3.5, en la que los subíndices del 1 al 6 se corresponden con la numeración asignada a las diferentes capas de la fachada, tal y como se indicó en el apartado experimental: 1) cara interior del enlucido sobre muro de bloques de hormigón; 2) capa intermedia entre el revestimiento de la fábrica de bloque de hormigón y la capa aislante de lana mineral; 3) lana mineral en cámara de aire; 4) cámara de aire; 5) cara interna de la hoja de vidrios fotovoltaicos en cámara de aire; 6) cara exterior de los vidrios fotovoltaicos.

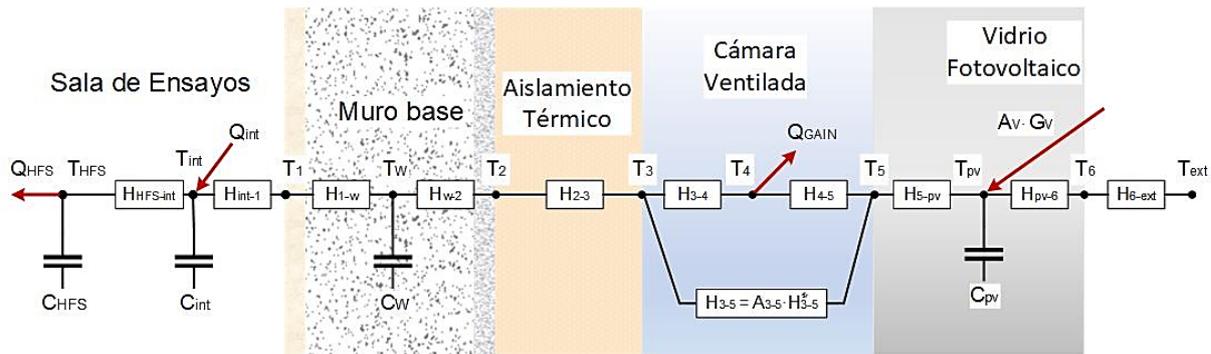


Figura 3.5 – Modelo RC de la solución de fachada FVFF.

Aunque se presenta el modelo como un todo, es el resultado de un trabajo progresivo de ajustes parciales y acumulativos, incluso considerando por separado las diferentes condiciones de operación de la fachada: alto caudal, bajo caudal, invierno, verano. Cabe hacer los siguientes comentarios generales:

- La parte del modelo que representa la sala de ensayos ha sido previamente determinada mediante un estudio de optimización del modelo RC para esta sala, realizado por Escudero[102], a partir de los datos experimentales obtenidos en el ensayo de calibración de la célula de ensayos EGUZKI [153].
- El subíndice HFS hace referencia a las paredes que tienen HFS-Tiles, mientras que el nodo de temperatura T_i se refiere al volumen de aire del interior de la sala de ensayos.
- La cámara de aire se representa con un modelo de segundo orden, en el que se han considerado dos vías de intercambio de calor: una convectiva entre las paredes que encierran la cámara (nodos T_3 y T_5) y el aire (nodo T_4), y otra vía de intercambio de calor por radiación entre las superficies 3 y 5. En el siguiente subapartado se describe con más detalle el funcionamiento de esta parte del modelo.

Los valores obtenidos para los distintos parámetros del modelo se han obtenido a partir de ajustes con el programa LORD para el conjunto de datos experimentales. Como se ha comentado, el principio de funcionamiento de esta herramienta es la correlación de todos los datos medidos (entradas) mediante parámetros determinados por iteración, al tiempo que se consigue la minimización del error entre los valores medidos y simulados para aquellos datos seleccionados para tal fin (salidas). En la Tabla 3.1 se listan las variables definidas como entradas y salidas del modelo, mientras que en la Tabla 3.2. se listan los valores finalmente obtenidos para los parámetros de correlación de dichas variables.

Tabla 3.1 – Variables definidas como entradas y salidas para la solución del modelo RC de la fachada FVFF

Variables definidas como entradas/ Parámetros conocidos	Variables definidas como salidas
Q_{HFS}, Q_i Medido en ensayo	Q_{GAIN}
$H_{HFS-i}, H_{i-1}, C_i, C_{HFS}$ Valores conocidos y constantes	T_2, T_3, T_4, T_5
$T_i, T_1, T_2, T_3,$ T_4, T_5, T_6, T_{ext} Temperaturas medidas en ensayo	
G_v Medido en ensayo	

Tabla 3.2 – Valores solución de los parámetros del modelo RC de la fachada FVFF ensayada

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
H _{1-w} [$W/m^2 \cdot K$]	5,25	H _{5-pv} [$W/m^2 \cdot K$]	270,7
H _{w-2} [$W/m^2 \cdot K$]	5,25	H _{pv-6} [$W/m^2 \cdot K$]	270,7
C _w [$kJ/(m^2 \cdot K)$]	216,5	C _{pv} [$kJ/(m^2 \cdot K)$]	17,2
H ₂₋₃ [$W/m^2 \cdot K$]	0,731	H _{6-ext} [$W/m^2 \cdot K$]	28,9
H ₃₋₄ [$W/m^2 \cdot K$]	Alto caudal: 21,3		A _v [-]
	Bajo caudal: 2,2		
H ₄₋₅ [$W/m^2 \cdot K$]	<i>Invierno Verano</i>		
	Alto caudal:	32,6 65,2	
	Bajo caudal:	2,9 5,8	
H ₃₋₅ [$W/m^2 \cdot K$]	3,4 – 5,3		
A ₃₋₅ [-]	1,076		

Debe destacarse el hecho de que las temperaturas de los nodos empleados para representar cada una de las capas de la fachada corresponden a los valores medios de los tres a cuatros sensores de temperatura ubicados en cada una, incluyendo la propia cámara de aire (T_4).

Por su parte, la determinación de la ganancia de calor Q_{GAIN} del flujo de aire a su paso por cámara se basa en el salto térmico respecto al ambiente exterior, tomando como temperatura final del aire el valor de temperatura en cámara, es decir: $T_4 - T_{EXT}$. Nótese que esta variable a pesar que no es una magnitud medida directamente sino calculada a partir de otras magnitudes, participa activamente en el proceso de solución del circuito térmico. Q_{GAIN} formó parte del grupo definido como variables experimentales de salida en las iteraciones hechas con la herramienta LORD (ver Tabla 3.2) y que por tanto eran las de referencia para el proceso de minimización del error. Se comprende esta forma de considerar a Q_{GAIN} cuando se tiene en cuenta que todos los fenómenos que ocurren en la cámara de aire se quieren representar en una forma tan simplificada como nodos de temperaturas medias y resistencias térmicas. Aspectos como este son el resultado del desarrollo de destrezas en el tratamiento de datos provenientes de ensayos en condiciones reales.

Como se ha comentado, tras el ajuste LORD con base en los datos experimentales el modelo RC para la FVFF es reconvertido a un modelo numérico que pueda ser implementado en cualquier herramienta de cálculo. Posteriormente y haciendo un camino inverso al realizado por el ajuste LORD, el modelo numérico es validado empleando los datos de ensayo. Como datos de entrada se toman las condiciones de radiación, temperatura exterior e interior del ensayo, y como parámetros de validación se usan los diferentes nodos de temperatura y el propio Q_{GAIN} .

3.3.2.1. Representación de la célula de ensayos

El estudio realizado por Escudero C. [5] determinó el modelo RC óptimo para representar la célula de ensayos EGUZKI. El proceso de optimización consistió en determinar el modelo con el menor orden posible que mantuviese la fiabilidad en los resultados. Dicho modelo se muestra en la Figura 3.6 con los valores indicados en la Tabla 3.3. Toma como nodos extremos la superficie interior de las HFS Tiles y la superficie interior de la muestra, pasando por un nodo intermedio que representa el aire interior de la sala de ensayos.

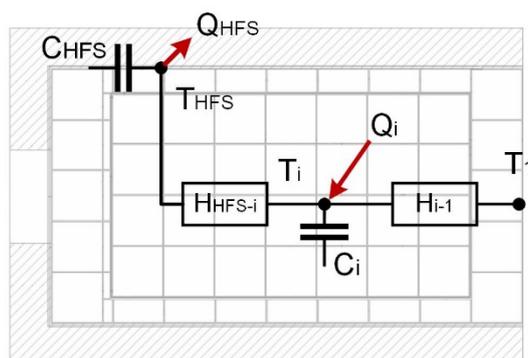


Figura 3.6 – Modelo RC óptimo para representar la sala de ensayos de la célula EGUZKI.

Tabla 3.3 – Valores de los parámetros del modelo RC óptimo para la sala de ensayos EGUZKI.

Parámetro	Nodo	Descripción	Valor	Comentario
T_{HFS}	Superficie del revestimiento interior con HFS-Tiles	Temperatura superficial interior de las HFS-Tiles	-	Valor instantáneo a medir en cada ensayo
Q_{HFS}		Flujo de calor a través de las HFS-Tiles	-	Valor instantáneo a medir en cada ensayo
C_{HFS}		Capacitancia Térmica en el nodo HFS-Tiles	0,556 [MJ/K]	Inercia térmica de las HFS-Tiles
H_{HFS-i}		Conductancia HFS-i	411,6 [W/K]	Inversa de la resistencia térmica entre las temperaturas interior y de sup. en HFS-Tiles.
T_i	Aire interior de la sala de ensayos	Temperatura del aire interior	-	Valor instantáneo a medir en cada ensayo
Q_i		Potencia Calefactora suministrada a la sala	-	Valor instantáneo a medir en cada ensayo
C_i		Capacitancia interior	0,018 [MJ/K]	Inercia térmica tanto del aire como del equipamiento auxiliar contenido en la sala
H_{i-1}		Conductancia i-1	78,3 [W/K]	Inversa de la resistencia térmica entre las temperaturas interior y de sup. en muestra.
T_1	Superficie de muestra	Temp. superficial en cara interior de muestra	-	Valor instantáneo a medir en cada ensayo

3.3.2.2. Representación de la hoja de vidrios fotovoltaicos

Luego de una serie de pruebas, el mejor ajuste se obtuvo tras considerar la radiación global vertical sur G_v incidiendo en el nodo interior de la hoja fotovoltaica correspondiente a la temperatura T_{pv} , y corregida con el parámetro de apertura A_v . Aunque el planteamiento intuitivo fuese que G_v se aplicara en el nodo más exterior correspondiente a T_6 , no resulta incoherente que el modelo funcione mejor con el nodo intermedio, pues físicamente la célula fotovoltaica se encuentra ubicada en medio de dos placas de vidrio.

La ventaja de los modelos de caja gris es que permiten reproducir matemáticamente un fenómeno físico sin tener que profundizar en las leyes físicas que los gobiernan. De esta manera, aunque el fenómeno termoeléctrico asociado a la generación de electricidad no está explícitamente representado en el circuito RC, la apertura A_v y la capacitancia C_{pv} producen la suficiente correlación para representar esta hoja fotovoltaica.

El valor obtenido para la apertura $A_v = 2,08$, concuerda con lo reflejado por estudios específicos de paneles fotovoltaicos, en los que el calentamiento del panel suele estar expresado en función de la radiación incidente con factores mayores que la unidad [154].

3.3.2.3. Representación del intercambio de calor en cámara

La cámara de aire se representa con un modelo de segundo orden, en el que se han considerado dos vías de intercambio de calor: una vía de transferencia por convección y otra por radiación.

3.3.2.3.1. Intercambio convectivo.

La transferencia de calor por convección ocurre entre cada una de las paredes que delimitan la cámara (nodos T_3 y T_5) y el aire que fluye por la misma (nodo T_4). El calor así transferido queda determinado por las expresiones de la ecuación (3.15), similares a la expresión de la ley de Newton del enfriamiento, por lo que las conductancias H_{3-4} y H_{4-5} pasan a considerarse coeficientes convectivos de estas superficies.

$$\begin{aligned} q_{4-5} &= H_{4-5}(T_5 - T_4) \\ q_{3-4} &= H_{3-4}(T_4 - T_3) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Durante el ajuste de estas conductancias convectivas, se detectó que los mejores resultados se obtenían tomando intervalos de datos coincidiendo con los periodos de bajo o de alto caudal. Tal y como se ha comentado en la parte experimental, los periodos de bajo caudal coinciden con una hoja fotovoltaica exterior “fría” y una capa aislante más caliente, situación que fundamentalmente corresponde a periodos nocturnos y/o nublados. Por otra parte, cuando la fachada está en alto caudal se debe a que el sistema de control ha detectado que la hoja fotovoltaica está más caliente que el propio ambiente exterior, lo que implica que es un instante soleado. Esta condición de operación es denominada “modo ganancia” con la fachada generando energía eléctrica y capturando energía térmica en el aire de cámara. En instantes de modo ganancia la capa aislante se encuentra a menor temperatura que la hoja fotovoltaica. El ajuste de los parámetros para esta rama de transferencia de calor por conducción produjo el resultado lógico de que la superficie más caliente requería un mayor coeficiente convectivo.

En la Figura 3.7 se representa la evolución de las temperaturas en fachada para el día 12 de marzo. Como se indica en la propia figura, desde las 10:00 hasta las 16:00 la fachada estuvo en modo ganancia a alto caudal y en estos instantes el mayor coeficiente convectivo corresponde a la superficie interior de la hoja fotovoltaica (T_5). El resto del día la fachada estuvo en bajo caudal y en esos instantes la superficie del aislamiento (T_3) era la más caliente y por tanto la de mayor coeficiente convectivo.

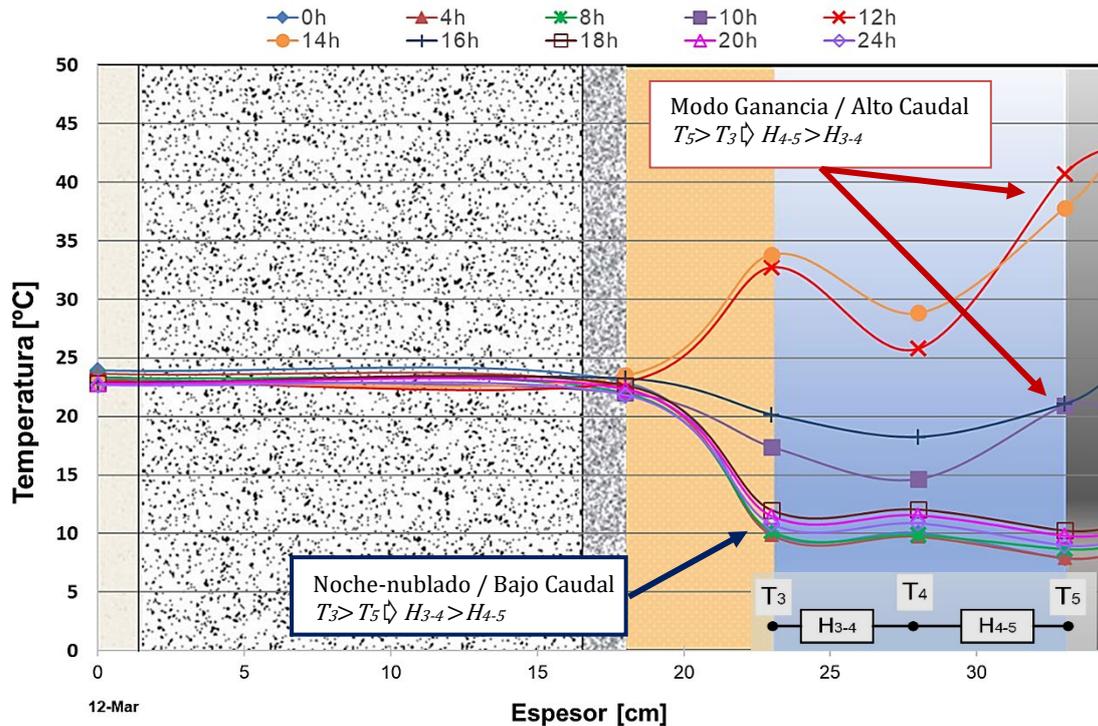


Figura 3.7 – Instantes de mayor coeficiente conductivo a lo largo del día 12 de marzo.

Esta alternancia de valores para las conductancias H_{3-4} y H_{4-5} también requirió un ajuste adicional para las condiciones de verano. La conductancia H_{3-4} usa los mismos valores de alto y bajo caudal tanto en invierno como en verano, mientras que la conductancia H_{4-5} tiene unos valores de alto y bajo caudal para invierno y otros para verano, tal y como se ha resumido en la anterior Tabla 3.2.

3.3.2.3.2. Intercambio por radiación en cámara.

La otra rama de intercambio de calor considerada en la cámara ha sido la transferencia por radiación directa entre la superficie exterior del asilamiento y la interior de la hoja fotovoltaica, capas 3 y 5.

El fenómeno que aquí ocurre corresponde al intercambio de calor por radiación entre dos placas paralelas grandes ([155] pg.753), determinable mediante la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$\begin{array}{c|c}
 \begin{array}{c} A_3 \\ T_3 \\ \varepsilon_3 \end{array} & \begin{array}{c} A_5 \\ T_5 \\ \varepsilon_5 \end{array} \\
 \hline
 \begin{array}{c} A_3 = A_5 = A \\ F_{35} = 1 \end{array}
 \end{array}
 \quad
 \frac{Q_{3-5}^R}{A} = q_{3-5}^R = \frac{\sigma(T_5^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\varepsilon_5} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1}
 \quad (3.16)$$

Donde, $A = A_3 = A_5 [m^2]$ es el área de las correspondientes superficies 3 y 5; $q_{3-5}^R [W/m^2]$ el flujo de calor intercambiado por radiación entre las correspondientes superficies 3 y 5; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$ es la constante de Stefan-Boltzman; T_3 y T_5 las temperaturas en K de las correspondientes superficies 3 y 5; ε_3 y ε_5 las emisividades adimensionales de las correspondientes superficies 3 y 5. Como se indica, se trata del caso

particular de intercambio por radiación en un recinto cerrado por dos superficies grises, difusas y opacas, por lo que el correspondiente factor de visión es $F_{35}=1$.

Las diferencias entre temperaturas empleadas por el modelo son lineales, así que se hace necesario linealizar esa diferencia que se presenta a la cuarta potencia. Para ello se hace uso de una aproximación basada en el desarrollo de series de Taylor indicado en la ecuación (3.48), la que suele producir un error de aproximación inferior al 0,2%.

$$T_5^4 - T_3^4 \cong 4\bar{T}_{3-5}^3(T_5 - T_3) \quad (3.17)$$

Donde \bar{T}_{3-5}^3 es la temperatura media entre T_3 y T_5 medida en grados Kelvin. Esta temperatura media en cada instante de tiempo se comporta como dato conocido, pues se determina con los valores de las temperaturas T_3 y T_5 del instante de tiempo anterior (para la primera iteración tomaría los valores de inicialización). Esto aplica tanto en el proceso de solución del modelo mediante LORD como en el modelo numérico posteriormente obtenido.

Sustituyendo la expresión de la ecuación (3.17) en la ecuación (3.16), se obtiene la expresión **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$q_{3-5}^R = \frac{4\sigma\bar{T}_{3-5}^3}{\frac{1}{\varepsilon_5} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1}(T_5 - T_3) \quad (3.18)$$

El coeficiente que multiplica a la diferencia de temperaturas ($T_5 - T_3$), es directamente la conductancia H_{3-5} . Sin embargo, en esta expresión hay un inconveniente y es que, aunque los valores de emisividad de las superficies 3 y 5 son valores constantes, no son propiedades conocidas ni fáciles de determinar.

Es posible compensar el desconocimiento del valor exacto de las emisividades aplicando un factor constante de ajuste determinado por el propio LORD. Este factor es conocido como apertura y normalmente es usada para ajustar el flujo de calor que entra al circuito RC a través de alguno de sus nodos. Como ejemplo se tiene la ganancia de calor por la radiación solar aplicada en el nodo de superficie exterior, o la ganancia de calor por calefacción aplicada en el nodo de aire interior. En estos dos flujos de calor la apertura determina la fracción de ganancia térmica que efectivamente fluye hacia el circuito.

En el caso del flujo de calor por radiación entre las superficies 3 y 5, la apertura compensará la imprecisión derivada de tener que asumir un valor para sus respectivas emisividades. LORD ajustará la apertura de tal manera que haga una compensación ya sea por defecto o por exceso, en su proceso iterativo de ajuste del modelo a los datos experimentales.

Teniendo esto en mente, la expresión para la transferencia de calor por radiación q_{3-5}^R puede ajustarse incluyendo una apertura A_{3-5} al tiempo que se asignan valores estimados ε_3^* y ε_5^* para las emisividades en las superficies 3 y 5 respectivamente, tal y como se indica en la ecuación (3.19)

$$q_{3-5}^R = A_{3-5} \cdot \frac{4\sigma\bar{T}_{3-5}^3}{\frac{1}{\varepsilon_5^*} + \frac{1}{\varepsilon_3^*} - 1} \cdot (T_5 - T_3) = A_{3-5} \cdot H_{3-5}^* \cdot (T_5 - T_3) \quad (3.19)$$

La conductancia H_{3-5} queda definida entonces como el producto de la apertura A_{3-5} y una pseudo-conductancia H_{3-5}^* tal y como se indica en la ecuación (3.20). Esta pseudo-conductancia se denomina así porque es determinada a partir de los valores asignados por estimación a las emisividades 3 y 5. Por el tipo de material que compone estas capas, el valor de sus emisividades corresponde a un intervalo entre 0,6 y 0,9: $\varepsilon_{3\wedge 5}^* \in [0,6 - 0,9]$. Se asigna a ambas superficies el mismo valor, estimado en 0,8.

$$H_{3-5} = A_{3-5} \cdot H_{3-5}^* = A_{3-5} \cdot \frac{4\sigma\bar{T}_{3-5}^3}{\frac{1}{\varepsilon_3^*} + \frac{1}{\varepsilon_5^*} - 1}; \quad \varepsilon_3^* = \varepsilon_5^* = 0,8 \quad (3.20)$$

3.3.3. Conversión a Modelo numérico

En este punto del análisis, el tratamiento de datos del ensayo mediante la herramienta LORD ha permitido determinar los valores para las distintas conductancias y capacitancias que resolvían el circuito RC de la fachada indicado en la Figura 3.5. Este ajuste tenía que considerar las distintas condiciones de operación de la fachada, y por tanto cada condición a considerar requirió un análisis LORD parcial que ajustaba el periodo en cuestión: alto caudal, bajo caudal, invierno, verano. Cabe destacar que el ajuste LORD se hace basado en archivos en los que se han registrado datos con una frecuencia de un minuto.

Ahora se hace necesario construir un modelo numérico que, basado en los parámetros determinados por LORD, resuelva los nodos de temperatura de la fachada en función de tres datos de entrada: temperatura ambiente interior, temperatura ambiente exterior y radiación solar global vertical. El paso de tiempo para este modelo se ha definido en 10 minutos, que es una frecuencia habitual en archivos meteorológicos.

El modelo numérico tiene que tener la capacidad de autorregularse automáticamente seleccionando los valores adecuados de conductancias y velocidad de aire en la cámara ventilada forzada para el modo de funcionamiento que corresponda en cada instante. Para ello se hace uso de una herramienta matemática conocida como la ecuación de ajuste de Boltzman.

La validación del modelo numérico hace un camino inverso al recorrido por LORD. Mientras que LORD ha partido del universo de datos experimentales y ha iterado hasta obtener los parámetros que ajustaban un modelo RC con mínimo error, el modelo numérico emplea los parámetros ajustados por LORD para obtener valores de los nodos de temperatura y luego compararse con los datos experimentales.

Otra particularidad del modelo numérico es que se han discretizado las capas conductivas de fábrica de ladrillo y de lana mineral en n nodos intermedios, mejorando el ajuste obtenido en la validación del modelo. Esta discretización aplica técnicas de métodos numéricos para la definición del balance energético de los nodos intermedios, comprobando la estabilidad del sistema al resolverlo de forma explícita. En cambio, la tercera capa conductiva correspondiente a la hoja fotovoltaica, debido a su poco espesor y propiedades se mostró inestable para ser resuelta numéricamente con un paso de tiempo de diez minutos. Un tanteo del modelo en el que

la hoja fotovoltaica era representada omitiendo el nodo intermedio T_{pv} produjo resultados satisfactorios y válidos.

Finalmente, el modelo numérico representa la cámara de aire manteniendo la estructura propuesta en el modelo RC.

A continuación, se describen en detalle los distintos componentes del modelo numérico, así como el proceso de adaptación desde el modelo RC resuelto en LORD.

3.3.3.1. Discretización del muro de bloque de hormigón

El modelo numérico planteado para las capas conductivas de fábrica de bloque de hormigón y lana mineral, corresponde a una combinación entre la aplicación de un balance de calor a los nodos externos y correlaciones derivadas de métodos numéricos en los nodos internos. Dichas expresiones derivadas de los métodos numéricos corresponden al caso de conducción de calor en régimen transitorio para pared plana

En la Figura 3.8 se representa la discretización del muro de bloque de hormigón en seis nodos intermedios y sus conexiones desde el interior hasta la capa de lana mineral. Esta capa de lana mineral a su vez es discretizada con un nodo intermedio como se mostrará más adelante.

El procedimiento en diferencias finitas aplicado ha sido del tipo explícito. Por tanto, el criterio para la definición de seis nodos intermedios resulta de la máxima subdivisión posible para conservar estabilidad en el modelo con el paso de tiempo deseado. Como se ha indicado, el paso de tiempo es de diez minutos.

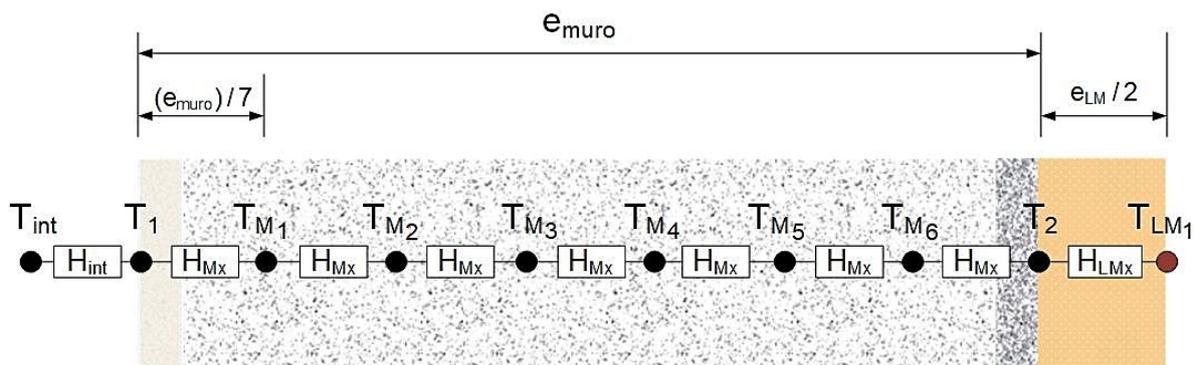


Figura 3.8 – Subdivisión del muro de bloque de hormigón en seis nodos internos de temperatura.

Antes de formular las expresiones que determinan cada uno de los nodos se hace necesario definir o determinar algunos términos, los cuales son listados en la Tabla 3.4

Tabla 3.4 – Parámetros empleados en la formulación del modelo para el muro de bloque de hormigón

Muro de bloques de hormigón (subíndice mh)										
e_{mh} [cm]	ρ_{mh} [$\frac{kg}{m^3}$]	$c_{p,mh}$ [$\frac{J}{kg K}$]	λ_{mh} [$\frac{W}{m K}$]	H_{mh} [$\frac{W}{m^2 K}$]	R_{mh} [$\frac{m^2 K}{W}$]	C_{mh} [$\frac{J}{m^2 K}$]	Δx_{mh} [cm]	R_{Mx} [$\frac{m^2 K}{W}$]	H_{Mx} [$\frac{W}{m^2 K}$]	τ_{mh} [adim]
15,5	1397	1000	0,407	2,623	0,381	216500	2,21	0,054	18,361	0,356

e_{mh} es el espesor de la fábrica de bloques de hormigón, mientras que ρ_{mh} la densidad, $c_{p,mh}$ el calor específico y λ_{mh} la conductividad.

H_{mh} representa la conductancia total del muro, que expresada a partir del circuito RC indicado en la anterior Figura 3.5, queda determinada mediante el desarrollo indicado en (3.21).

$$\frac{1}{H_{mh}} = \frac{1}{H_{1-w}} + \frac{1}{H_{w-2}}; \quad (3.21)$$

$$H_{1-w} = H_{w-2} \therefore H_{mh} = \frac{H_{1-w}}{2}$$

R_{mh} es la resistencia térmica total del muro y corresponde a la inversa de la conductancia total H_{mh} . A partir de esta resistencia total se determina R_{Mx} que es la resistencia parcial de cada uno de los siete tramos discretos en que se ha subdividido el muro. Como la distribución de la resistencia térmica total se considera igualmente proporcional para todos los tramos, esta resistencia parcial se determina simplemente como $R_{Mx} = R_{mh}/7$. Por su parte H_{Mx} es la conductancia del tramo, que bien puede determinarse como la inversa de R_{Mx} o como la distribución proporcional de H_{mh} en los siete tramos mediante la relación $H_{Mx} = 7H_{mh}$.

Δx_{mh} es el tamaño de cada uno de los siete tramos discretos dentro del muro determinado por el cociente $\Delta x_{mh} = e_{mh}/7$.

Finalmente, τ_{mh} es un término adimensional conocido como “número discreto de Fourier”, el cual está determinado para el caso del muro de bloques de hormigón por la ecuación (3.22).

$$\tau_{mh} = \frac{\alpha_{mh} \Delta t}{\Delta x_{mh}^2} \quad (3.22)$$

El paso de tiempo Δt es el deseado para el modelo de 10 minutos mientras que el término α_{mh} es la difusividad térmica del muro, determinada por la ecuación (3.23).

$$\alpha_{mh} = \frac{\lambda_{mh}}{\rho_{mh} c_{p,mh}} \quad (3.23)$$

3.3.3.1.1. *Nodo T_1*

En el nodo superficial interior del muro T_1 se aplica el balance de flujos de calor indicado en la ecuación (3.24), con el nodo T_1 expresado para el instante de tiempo $(i + 1)$ y los demás nodos expresados para el instante anterior (i) . El intercambio de calor es convectivo hacia el nodo de aire interior T_{int} a través del coeficiente de convección H_{int} y conductivo hacia el siguiente nodo interior T_{M_1} a través de la conductancia H_{Mx} , o lo que es lo mismo, su inversa la resistencia térmica R_{Mx} .

$$H_{int}(T_{int}^i - T_1^{i+1}) + H_{Mx}(T_{M_1}^i - T_1^{i+1}) = 0$$

$$T_1^{i+1} = \frac{H_{int}}{H_{int} + H_{Mx}} T_{int}^i + \frac{H_{int}}{H_{int} + H_{Mx}} T_{M_1}^i \quad (3.24)$$

3.3.3.1.2. Nodos T_{M1} a T_{M6}

Los seis nodos intermedios en que se ha subdividido el muro se resuelven mediante la formulación en diferencia finitas de un elemento interno que intercambia calor por conducción y que carece de una fuente interna de generación, definida por la ecuación (3.25). En esta se expresa la temperatura de un nodo intermedio en la posición x , en el tiempo $(i + 1)$, en función de su propia temperatura en el tiempo (i) , y de las temperaturas de los nodos anterior en la posición $(x - 1)$ y posterior en la posición $(x + 1)$ en este mismo tiempo (i) .

$$T_{nodo\ x}^{i+1} = \tau T_{nodo\ x-1}^i + (1 - 2\tau)T_{nodo\ x}^i + \tau T_{nodo\ x+1}^i \quad (3.25)$$

Aplicando esta ecuación (3.25) a cada uno de los seis nodos intermedios definidos para el muro de bloques de hormigón, se obtienen las ecuaciones que se indican a continuación.

Para el nodo T_{M1} , la ecuación (3.26).

$$T_{M1}^{i+1} = \tau_{mh} T_1^i + (1 - 2\tau_{mh})T_{M1}^i + \tau_{mh} T_{M2}^i \quad (3.26)$$

Para el nodo T_{M2} , la ecuación (3.27).

$$T_{M2}^{i+1} = \tau_{mh} T_{M1}^i + (1 - 2\tau_{mh})T_{M2}^i + \tau_{mh} T_{M3}^i \quad (3.27)$$

Para el nodo T_{M3} , la ecuación (3.28).

$$T_{M3}^{i+1} = \tau_{mh} T_{M2}^i + (1 - 2\tau_{mh})T_{M3}^i + \tau_{mh} T_{M4}^i \quad (3.28)$$

Para el nodo T_{M4} , la ecuación (3.29).

$$T_{M4}^{i+1} = \tau_{mh} T_{M3}^i + (1 - 2\tau_{mh})T_{M4}^i + \tau_{mh} T_{M5}^i \quad (3.29)$$

Para el nodo T_{M5} , la ecuación (3.30).

$$T_{M5}^{i+1} = \tau_{mh} T_{M4}^i + (1 - 2\tau_{mh})T_{M5}^i + \tau_{mh} T_{M6}^i \quad (3.30)$$

Para el nodo T_{M6} , la ecuación (3.31).

$$T_{M6}^{i+1} = \tau_{mh} T_{M5}^i + (1 - 2\tau_{mh})T_{M6}^i + \tau_{mh} T_2^i \quad (3.31)$$

El método explícito limita el valor más grande admisible del intervalo de tiempo de acuerdo al criterio de estabilidad, que requiere que todos los coeficientes primarios sean positivos o cero. Los coeficientes primarios son aquellos que en la fórmula que determina la temperatura de un nodo para el instante $(i + 1)$ multiplican al mismo nodo de temperatura en el instante (i) . Para T_1 que es el primer nodo del muro, el coeficiente primario es cero. Lo mismo sucede

con el último nodo de esta pared de hormigón T_2 tal y como se mostrará más adelante. Para el resto de nodos interiores el coeficiente primario es el mismo: $(1 - 2\tau_{mh})$, que según los valores de la Tabla 3.4 en efecto producen un valor mayor que cero: $1 - 2\tau_{mh} = 0,288 > 0$.

3.3.3.2. Discretización de la capa de lana mineral

Para la capa de aislamiento de lana mineral se considera un nodo intermedio designado como T_{LM1} tal y como se representa en la Figura 3.9. Para la formulación del balance térmico de los nodos asociados a esta capa: T_2, T_{LM1} y T_3 , se hace necesario definir o determinar los términos listados en la Tabla 3.5. Tal y como se indicó en el proceso LORD, para esta capa no se consideró capacitancia térmica, así que la capacitancia indicada en esta tabla es informativa y se determina a partir del dato de fabricante para el calor específico c_{p_LM} y para la densidad ρ_{LM} , empleando la relación $C_{LM} = e_{LM}\rho_{LM}c_{p_LM}$. En cambio, el valor de conductividad es el determinado a partir de la conductancia H_{2-3} determinada por LORD empleando la relación $\lambda_{LM} = e_{LM}H_{2-3}$. Como se indica, de LORD se deduce un valor de $\lambda_{LM} = 0,037[W/m^2K]$, un poco más alto que el nominal de $0,034[W/m^2K]$ dado por el fabricante.

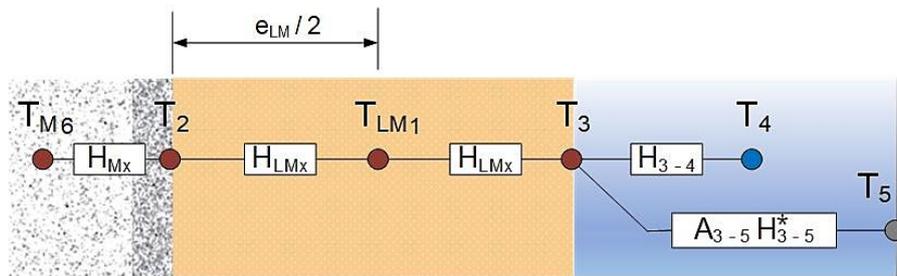


Figura 3.9 – Subdivisión de la capa de lana mineral con un nodo intermedio de temperatura.

Tabla 3.5 – Parámetros empleados en la formulación del modelo para la capa de lana mineral

Capa de aislamiento con lana mineral (LM) ¹										
e_{LM} [cm]	ρ_{LM}^1 [kg/m ³]	$c_{p_LM}^1$ [J/kg K]	λ_{LM} [W/m K]	H_{2-3} [W/m ² K]	R_{2-3} [m ² K/W]	C_{LM} [J/m ² K]	Δx_{LM} [cm]	R_{LMx} [m ² K/W]	HL_{Mx} [W/m ² K]	τ_{LM} [adim]
5,0	22	800	0,037	0,731	1,368	880	2,5	0,684	1,462	1,994

¹Referencia Ursa Terra Vento P8752 Rollo de 50 mm Código 2141944 (Ver anexo)

3.3.3.2.1. Nodo T_2

En el nodo que representa la intercapa entre el muro y el aislamiento T_2 se aplica el balance de flujos de calor indicado en la ecuación (3.32), con el nodo T_2 expresado para el instante de tiempo $(i + 1)$ y los demás nodos expresados para el instante anterior (i) . El intercambio de calor es conductivo hacia el último nodo de discretización del muro de hormigón T_{M6} a través de la conductancia H_{Mx} , e igualmente conductivo hacia el siguiente nodo en el interior de la

lana mineral T_{LM_1} a través de la conductancia H_{LMx} , o lo que es lo mismo, sus inversas la resistencia térmica R_{LMx} .

$$H_{Mx}(T_{M_6}^i - T_2^{i+1}) + H_{LMx}(T_{LM_1}^i - T_2^{i+1}) = 0$$

$$T_2^{i+1} = \frac{H_{Mx}}{H_{Mx} + H_{LMx}} T_{M_6}^i + \frac{H_{LMx}}{H_{Mx} + H_{LMx}} T_{LM_1}^i \quad (3.32)$$

3.3.3.2.2. Nodo intermedio T_{LM_1}

En el caso de esta capa de lana mineral y con los valores indicados en la Tabla 3.5, se tiene que el criterio de estabilidad produce un valor menor que cero: $1 - 2\tau_{LM} = -3,036 < 0$. Por esta razón el formulamiento para este nodo se hace de forma implícita, con base en la expresión general de la ecuación (3.33) para el caso sin fuente de generación de calor interna.

$$T_{nodo\ x-1}^{i+1} - 2T_{nodo\ x}^{i+1} + T_{nodo\ x+1}^{i+1} = \frac{T_{nodo\ x}^{i+1} - T_{nodo\ x}^i}{\tau_{LM}} \quad (3.33)$$

Remplazando para el caso del nodo T_{LM_1} y despejando se tiene la expresión indicada en la ecuación (3.34).

$$T_2^{i+1} - 2T_{LM_1}^{i+1} + T_3^{i+1} = \frac{T_{LM_1}^{i+1} - T_{LM_1}^i}{\tau_{LM}} \quad (3.34)$$

$$T_{LM_1}^{i+1} = \frac{\tau_{LM}}{1 + 2\tau_{LM}} T_2^{i+1} + \frac{1}{1 + 2\tau_{LM}} T_{LM_1}^i + \frac{\tau_{LM}}{1 + 2\tau_{LM}} T_3^{i+1}$$

3.3.3.2.3. Nodo T_3

Este nodo de temperatura interactúa con otros tres y su balance está determinado por la ecuación (3.35). El nodo T_3 es expresado para el instante de tiempo $(i + 1)$ y los demás nodos expresados para el instante (i) . La conductancia convectiva H_{3-4} y la de intercambio por radiación H_{3-5}^* son variables en el tiempo, así que también están referenciadas al instante (i) .

$$H_{LM_1}(T_{LM_1}^i - T_3^{i+1}) + H_{3-4}^i(T_4^i - T_3^{i+1}) + A_{3-5}H_{3-5}^{*i}(T_5^i - T_3^{i+1}) = 0$$

$$T_3^{i+1} = \frac{1}{H_{LM_1} + H_{3-4}^i + A_{3-5}H_{3-5}^{*i}} (H_{LM_1}T_{LM_1}^i + H_{3-4}^iT_4^i + A_{3-5}H_{3-5}^{*i}T_5^i) \quad (3.35)$$

3.3.3.3. Cámara de aire

En el balance del nodo que representa la cámara de aire participan las conductancias que equivalen a los coeficientes convectivos con las superficies de lana mineral y hoja fotovoltaica, así como el calor ganado por el flujo de aire a su paso por la cámara (Figura 3.10). Este flujo de calor es determinado a partir del salto térmico desde las condiciones del exterior hasta la propia temperatura representativa de la cámara de aire T_4 . El nodo T_4 es expresado para el

instante de tiempo $(i + 1)$ y los nodos T_3 y T_5 son expresados para el instante (i) . Tal y como se ha comentado en el apartado 3.3.2.3.1, las dos conductancias convectivas son variables en función del nivel de caudal en cámara, así como de si se trata de invierno o verano. Es por ello que estas conductancias también son expresadas en función del instante de tiempo $(i + 1)$.

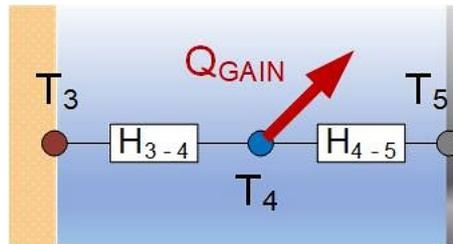


Figura 3.10 – Nodos de temperatura, calor ganado y conductancias en cámara de aire.

Para comprender el proceso que permite obtener la expresión de balance de calor en la cámara definida para el modelo numérico, es necesario hacer unas distinciones en el término de conductancia que hasta ahora no han sido comentadas.

La herramienta LORD realiza un balance del circuito RC a partir del conteo de valores netos totales para el flujo de calor que fluye por el circuito entre los respectivos nodos de temperatura. Dicho de otra manera, los componentes del circuito que determina LORD no están expresados por unidad de superficie. Si se quieren expresar conductividades y capacitancias como magnitudes específicas por unidad de superficie, es necesario dividir las por el área transversal al flujo de calor asociada a la rama del circuito en cuestión. Por ejemplo, la conductancia que representa el intercambio con las paredes del interior de la célula de ensayos, expresada como magnitud específica ha de dividirse entre la suma del área de dichas paredes. Otro ejemplo, la conductancia de intercambio de calor entre el aire interior de la célula y la superficie interior de la muestra, ha de dividirse entre el área de la muestra para que represente el coeficiente convectivo de intercambio de calor en esta superficie.

Los valores solución para el circuito RC indicados con anterioridad en la Tabla 3.2 se han expresado como magnitudes específicas por unidad de área. En el caso de las conductancias convectivas H_{3-4} y H_{4-5} , estas han sido calculadas como magnitudes específicas por unidad de área tomando como referencia el área de fachada de $2,7 \times 2,7 \text{ m}^2$.

Teniendo en cuenta lo anterior, cabe resaltar que el balance de flujos de calor en el nodo T_4 de la Figura 3.10 implica operar con el factor de área de muestra $A_{muestra} = 2,7 \times 2,7 \text{ m}^2$ para que haya coherencia dimensional. En este caso se aplica este factor de área como divisor del flujo de calor Q_{GAIN} para que dicho término quede expresado en W/m^2 .

Por último, recordando que la ganancia de calor en el aire es función de su caudal másico \dot{m}_a y calor específico $c_{p,air}$, la expresión de balance de flujos de calor en la cámara de aire produce la relación indicada en la ecuación (3.36).

$$H_{3-4}^{i+1}(T_3^i - T_4^{i+1}) + H_{4-5}^{i+1}(T_5^i - T_4^{i+1}) = \frac{\dot{m}_a^{i+1} c_{p,air}}{7,29} (T_4^{i+1} - T_{ext}^{i+1})$$

$$T_4^{i+1} = \frac{1}{H_{3-4}^{i+1} + H_{4-5}^{i+1} + \frac{\dot{m}_a^{i+1} c_{p,air}}{7,29}} \left(H_{3-4}^{i+1} T_3^i + H_{4-5}^{i+1} T_5^i + \frac{\dot{m}_a^{i+1} c_{p,air}}{7,29} T_{ext}^{i+1} \right) \quad (3.36)$$

El caudal másico de aire varía en función de las condiciones de operación de la fachada, y está determinado por la ecuación (3.37) como el producto de densidad ρ_{air} por velocidad v_{air} del aire. Estas a su vez son expresadas en función de valores instantáneos de ciertas temperaturas de la fachada

$$\dot{m}_a^{i+1} = \rho_{air}^{i+1} v_{air}^{i+1} \quad (3.37)$$

La densidad del aire es determinada en función de la temperatura instantánea en la cámara de aire T_4 [$^{\circ}C$], mediante la aproximación polinómica indicada en la ecuación (3.38)

$$\begin{aligned} \rho_{air}^{i+1} &= aT_4^{i2} + bT_4^i + c \left[\frac{kg}{m^3} \right]; \\ a &= 1,28867834712515 \times 10^{-5} \\ b &= -4,64883577269998 \times 10^{-3} \\ c &= 1,27739199188878 \end{aligned} \quad (3.38)$$

Por su parte la velocidad del aire debe ajustarse de forma automática al criterio de alto caudal cuando la fachada está en modo ganancia térmica, y bajo caudal en condiciones nubladas o nocturnas. Esto se consigue mediante la correlación que se indica en el subapartado siguiente.

3.3.3.3.1. Velocidad de aire mediante ajuste sigmoide de Boltzmann

La función de ajuste sigmoide de Boltzmann pertenece a las clásicas funciones denominadas *funciones en forma de S* junto con otras como la función acumulada de Gauss o la de Lorentz[156]. Está basada en la ecuación sigmoide dada por $y = 1/(1 + e^x)$ y constituye un apropiado punto de partida para la predicción de fenómenos que hacen transición entre una cota inferior y otra superior.

El ajuste sigmoide Boltzmann modificado definido para obtener la velocidad de aire en la cámara en función del salto térmico de la hoja fotovoltaica respecto al exterior, se indica de forma genérica en la ecuación (3.39) a partir de las variables indicadas en la Figura 3.11.

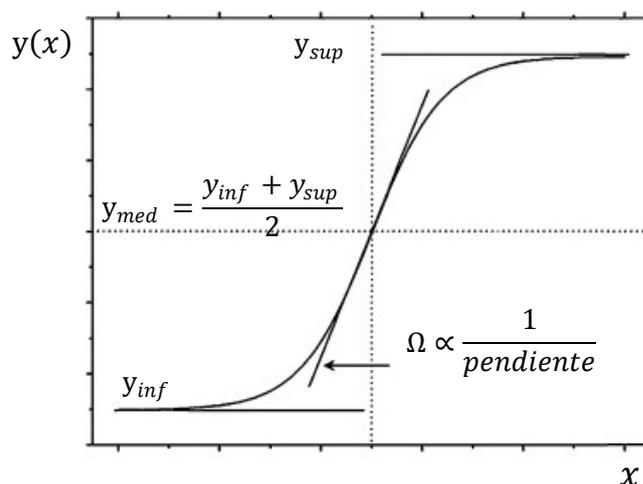


Figura 3.11 – Elementos para la definición del ajuste Boltzmann.

$$y(x) = y_{sup} - \frac{y_{sup} - y_{inf}}{\left(1 + e^{\frac{x - y_{med}}{\Omega}}\right)} \quad (3.39)$$

A partir de esta expresión y graficando los datos experimentales para el ensayo en condiciones de invierno, se obtiene el ajuste sigmoide de Boltzmann indicado en la Figura 3.12 y la ecuación (3.40). El elemento en la ecuación de ajuste denominado Ω es indicador de la intensidad de la razón de cambio del valor de la función entre las dos cotas y se resuelve por tanteo tomado como un valor orientativo de partida $1/(10 \cdot pendiente)$. Los valores de y_{inf} y de y_{sup} corresponden al valor medio de los datos experimentales en dichas cotas, y la recta de la zona de transición resulta del ajuste lineal de los puntos en dicho tramo.

$$f_{invierno} = 0.7527 - \frac{0.71519}{\left(1 + e^{\frac{\Delta T - 7.38614}{0.89578}}\right)} \quad (3.40)$$

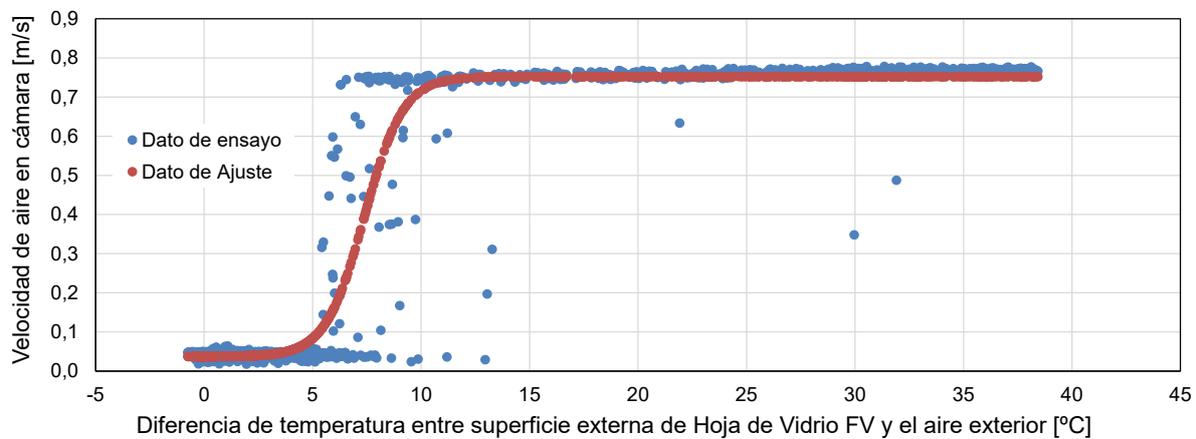


Figura 3.12 – Ajuste sigmoide de Boltzmann para la velocidad de aire en cámara durante el invierno.

Reescribiendo la ecuación (3.40) en la notación utilizada para el resto del modelo, se tiene que la velocidad de aire en la cámara ventilada, en condiciones de invierno, para el instante de tiempo $(i + 1)$, está dada por la ecuación (3.41) en función de la diferencia de temperaturas entre T_6 y T_{ext} para el instante (i) .

$$v_{airinv}^{i+1} = 0.7527 - \frac{0.71519}{\left(1 + e^{\frac{(T_6^i - T_{ext}^i) - 7.38614}{0.89578}}\right)} \quad (3.41)$$

Cabe destacar que el ajuste obtenido para la velocidad de aire en cámara se identifica específicamente como de invierno. Esto se debe a que en condiciones de verano el ajuste obtenido a partir de datos de invierno se muestra menos preciso, y se hace necesario recalcular la función S de Boltzmann con los correspondientes datos de ensayo estival. Mas adelante se indica este nuevo ajuste. La causa de esta diferencia puede radicar en que para un mismo

régimen de trabajo en la soplante, la densidad del aire cambia de invierno a verano y la masa de aire extraída varía levemente.

3.3.3.4. Hoja exterior de vidrios fotovoltaicos

Mientras que en el proceso de solución del circuito RC mediante la herramienta LORD, el uso de un nodo intermedio en el interior de la hoja de vidrios fotovoltaicos produjo un buen resultado, con la discretización de esta capa para convertirla a modelo numérico no ocurre lo mismo. El paso de tiempo de diez minutos es muy grande para que sea estable un modelo de diferencias finitas considerando el nodo de temperatura T_{pv} . Debe recordarse que el ajuste LORD se hace sobre datos basados en registros hechos a cada minuto, y que esta herramienta basa sus cálculos en técnicas estadísticas potentes que le permiten conseguir convergencias.

Por tanto, se hizo el tanteo de representar la hoja fotovoltaica exterior en el modelo sin nodo intermedio tal y como se indica en la Figura 3.13, pero manteniendo la apertura A_v en el valor determinado por LORD. Se comprobó luego en el proceso de validación que esta era una asunción completamente válida que funcionaba adecuadamente para el ajuste de la fachada en su conjunto, tanto en periodo de invierno como de verano, y para la totalidad de cada periodo a pesar de su gran variabilidad. En cierta forma el usar esta apertura en el nodo exterior con un valor mucho mayor que la unidad va en contra del concepto físico que debería tener este término, pero por el buen resultado obtenido es de esperar que hacer esto produce una compensación a la omisión de la capacitancia térmica en esta capa.

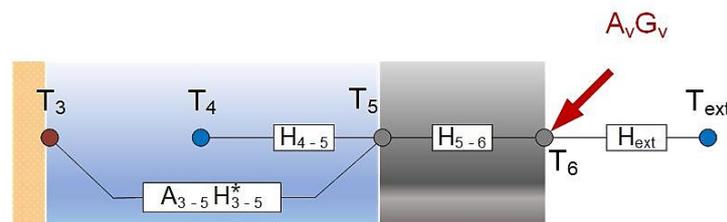


Figura 3.13 – Representación de la hoja de vidrios fotovoltaicos para el modelo numérico.

La conductancia directa entre los nodos cinco y seis H_{5-6} se relaciona con la conductancia intermedia determinada por LORD: $H_{5-pv} = H_{pv-6}$, mediante la ecuación (3.42)

$$H_{5-6} = H_{5-pv}/2 \quad (3.42)$$

Por su parte, la apertura A_v se mantiene en su valor determinado por LORD.

Los parámetros característicos de la hoja exterior de la fachada ventilada forzada formada por los vidrios fotovoltaicos, se indican en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 – Parámetros característicos de la hoja exterior formada por vidrios fotovoltaicos opacos.

Muro de bloques de hormigón (mh)						
e_{fv}	ρ_{fv}	$c_{p,fv}$	λ_{fv}	H_{5-6}	R_{5-6}	C_{fv}
[cm]	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\left[\frac{J}{kg K}\right]$	$\left[\frac{W}{m K}\right]$	$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$	$\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$	$\left[\frac{J}{m^2 K}\right]$
0,61	2390 ²	1180 ²	0,826	135,4 ¹	0,007	17200 ¹

¹Determinado LORD. ²Calculado por iteración a partir de C_f

Del ajuste LORD era conocido el valor de C_{fv} . El dimensionamiento en tamaño y peso de uno de los módulos (Figura 3.14) permitió estimar su densidad en torno a $2397,5 \text{ kg/m}^3$. A partir de estos se determinó $c_{p_{fv}}$.



Figura 3.14 – Mediciones en módulo de vidrio fotovoltaico opaco para estimar su densidad.

3.3.3.4.1. Nodo T_5

El balance de flujo de calor del nodo superficial interior de la hoja fotovoltaica y que interactúa con la cámara de aire queda expresado mediante la ecuación (3.43).

$$A_{3-5}H_{3-5}^*(T_3^i - T_5^{i+1}) + H_{4-5}^i(T_4^i - T_5^{i+1}) + H_{5-6}(T_6^i - T_5^{i+1}) = 0$$

$$T_5^{i+1} = \frac{1}{A_{3-5}H_{3-5}^* + H_{4-5}^i + H_{5-6}} (A_{3-5}H_{3-5}^*T_3^i + H_{4-5}^iT_4^i + H_{5-6}T_6^i) \quad (3.43)$$

3.3.3.4.2. Nodo T_6

El balance de flujo de calor del nodo superficial exterior de la hoja fotovoltaica queda expresado mediante la ecuación (3.44).

$$H_{5-6}(T_5^i - T_6^{i+1}) + H_{ext}(T_{ext}^{i+1} - T_6^{i+1}) = A_v G_v^{i+1}$$

$$T_6^{i+1} = \frac{H_{5-6}}{H_{5-6} + H_{ext}} T_5^i + \frac{H_{5-6}}{H_{5-6} + H_{ext}} T_{ext}^{i+1} + \frac{1}{H_{5-6} + H_{ext}} A_v G_v^{i+1} \quad (3.44)$$

3.3.3.5. Planteamiento del modelo numérico

Con base en todas las expresiones indicadas desde la ecuación (3.24) hasta la ecuación (3.44), se puede resumir el conjunto de ecuaciones que resuelve térmicamente la fachada mediante la igualdad matricial indicada en la ecuación (3.45), que se desarrolla en las posteriores ecuaciones de la (3.46) a la (3.52).

Es el planteamiento de un modelo numérico ideado para que funcione con pasos de tiempo de diez minutos, que requiere un primer valor de inicialización de todas las variables en el tiempo inicial $t_0 = 0$, y que toma como datos de entrada cinco parámetros: tres series

temporales de datos formados por la temperatura de aire interior T_{int} , la temperatura de aire exterior T_{ext} , y la radiación global incidente en la superficie vertical exterior G_v ; y dos valores constantes para los coeficientes de convección interior y exterior correspondientes a las conductancias H_{int} y H_{ext} . Alternativamente el modelo puede acotarse a partir de la temperatura superficial interior T_1 , tomando esta como dato de entrada y por tanto no es necesario el parámetro de convección interior H_{int} .

La solución del modelo puede hacerse con cualquier herramienta de cálculo que permita definir esta ecuación matricial, determinando los valores de todos los nodos de temperatura para cada paso de tiempo. El proceso de definición del modelo numérico dentro del paquete informático que lo resolverá, estaría basado en los procesos y rutinas que se indican en el algoritmo mostrado por la Figura 3.15, la Figura 3.16 y la Figura 3.17.

En particular el resultado de mayor interés para el planteamiento hecho por esta Tesis Doctoral, es la temperatura conseguida en la cámara de aire T_4 , la cual constituye la base para el siguiente capítulo en el que se hace un análisis a nivel edificio.

$$\{T_{i+1}\} = [A]\{T_i\} + [B]\{U_{i+1}\} \quad (3.45)$$

$$\{T_i\} = \begin{Bmatrix} T_1^i \\ T_{W_1}^i \\ T_{W_2}^i \\ T_{W_3}^i \\ T_{W_4}^i \\ T_{W_5}^i \\ T_{W_6}^i \\ T_2^i \\ T_{RW_1}^i \\ T_2^{i+1} \\ T_3^{i+1} \\ T_3^i \\ T_4^i \\ T_5^i \\ T_6^i \end{Bmatrix} \quad (3.46)$$

$$\{U_{i+1}\} = \begin{Bmatrix} T_{int}^{i+1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ T_{ext}^{i+1} \\ 0 \\ G_v^{i+1} \end{Bmatrix} \quad (3.47)$$

$$[A] = \begin{bmatrix}
 0 & \frac{H_{int}}{H_{int} + H_{W_x}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \tau_W & 1 - 2\tau_W & \tau_W & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \tau_W & 1 - 2\tau_W & \tau_W & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \tau_W & 1 - 2\tau_W & \tau_W & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \tau_W & 1 - 2\tau_W & \tau_W & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_W & 1 - 2\tau_W & \tau_W & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_W & 1 - 2\tau_W & \tau_W & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_{RW_x}}{H_{W_x} + H_{RW_x}} & 0 & \frac{H_{RW_x}}{H_{W_x} + H_{RW_x}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{1 + 2\tau_{RW}} & \frac{\tau_{RW}}{1 + 2\tau_{RW}} & \frac{\tau_{RW}}{1 + 2\tau_{RW}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 \\
 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_{RW_x}}{H_{RW_x} + H_{3-4}^i + A_{3-5}H_{3-5}^i} & 0 & 0 & 0 & \frac{H_{3-4}^i}{H_{RW_x} + H_{3-4}^i + A_{3-5}H_{3-5}^i} & \frac{A_{3-5}H_{3-5}^i}{H_{RW_x} + H_{3-4}^i + A_{3-5}H_{3-5}^i} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_{3-4}^{i+1}}{H_{3-4}^{i+1} + H_{4-5}^{i+1} + \frac{\dot{m}_{air}^{i+1} C_{p,air}}{7.29}} & 0 & \frac{H_{3-4}^{i+1}}{H_{3-4}^{i+1} + H_{4-5}^{i+1} + \frac{\dot{m}_{air}^{i+1} C_{p,air}}{7.29}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{A_{3-5}H_{3-5}^i}{A_{3-5}H_{3-5}^i + H_{4-5}^i + H_{5-6}} & \frac{H_{4-5}^i}{A_{3-5}H_{3-5}^i + H_{4-5}^i + H_{5-6}} & \frac{H_{5-6}}{A_{3-5}H_{3-5}^i + H_{4-5}^i + H_{5-6}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{H_{5-6}}{H_{5-6} + H_{ext}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$H_{4-5}^i = \begin{cases} 32.6 & \text{if } v_{air}^i \geq 0.4 \text{ (winter)} \\ 2.9 & \text{if } v_{air}^i < 0.4 \text{ (winter)} \\ 65.2 & \text{if } v_{air}^i \geq 0.4 \text{ (summer)} \\ 5.8 & \text{if } v_{air}^i < 0.4 \text{ (summer)} \end{cases} \quad (3.49)$$

$$H_{3-4}^i = \begin{cases} 21.3 & \text{if } v_{air}^i \geq 0.4 \\ 2.2 & \text{if } v_{air}^i < 0.4 \end{cases} \quad (3.50)$$

$$\begin{aligned} H_{3-5}^i &= a(T_4^i)^2 + bT_4^i + c \\ a &= 1.28867834712515 \times 10^{-5} \\ b &= -4.64883577269998 \times 10^{-3} \\ c &= 1.27739199188878 \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\dot{m}_{air}^{i+1} = \rho_{air}^{i+1} v_{air}^{i+1} S_{chamber} \quad (3.52)$$

$S_{chamber}$: Air chamber cross – section

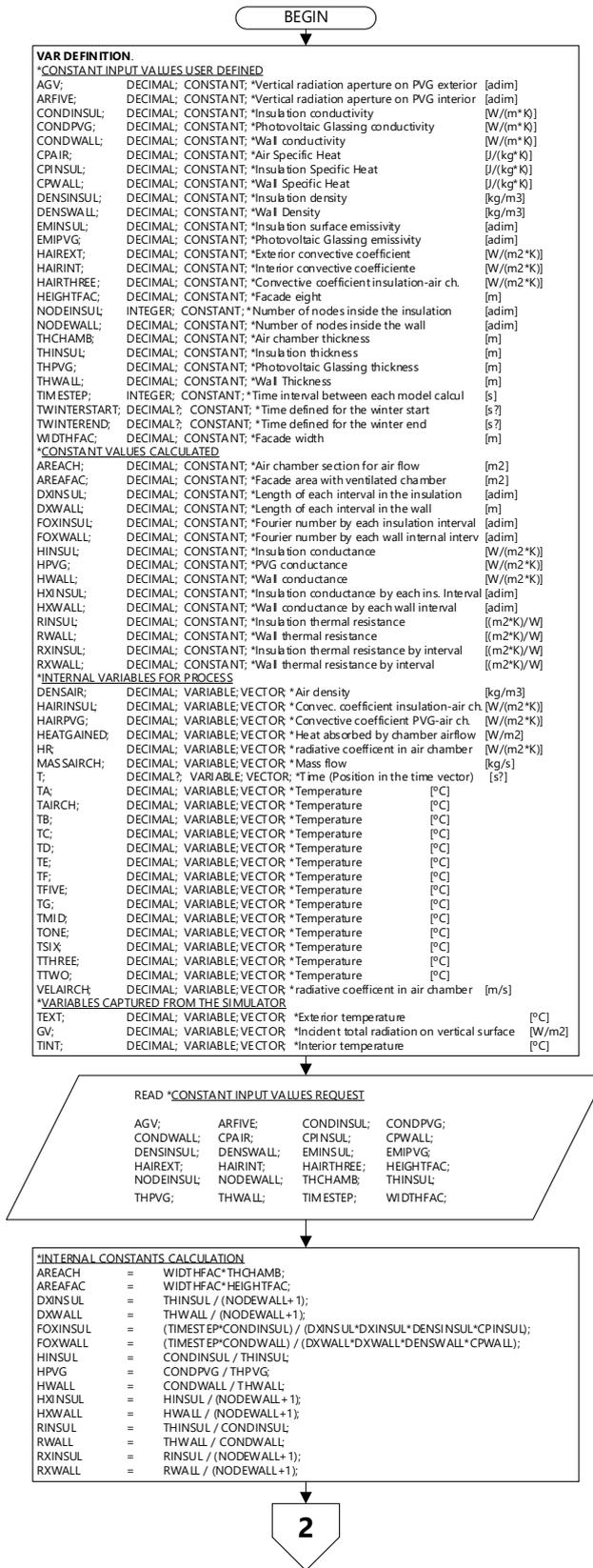


Figura 3.15 – Algoritmo para la implementación del modelo numérico en herramienta de cálculo computacional (página 1/3).

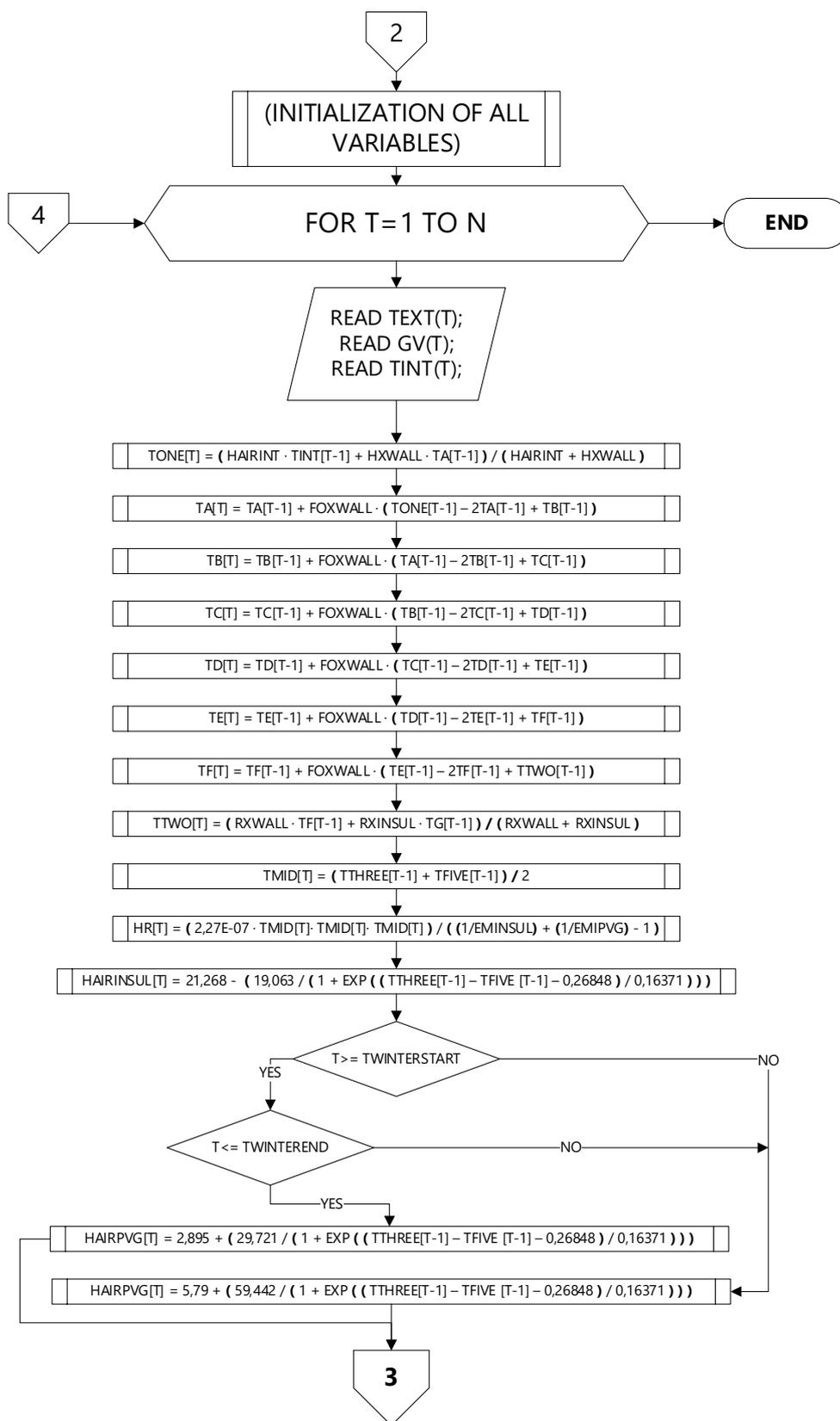


Figura 3.16 – Algoritmo para la implementación del modelo numérico en herramienta de cálculo computacional (página 2/3).

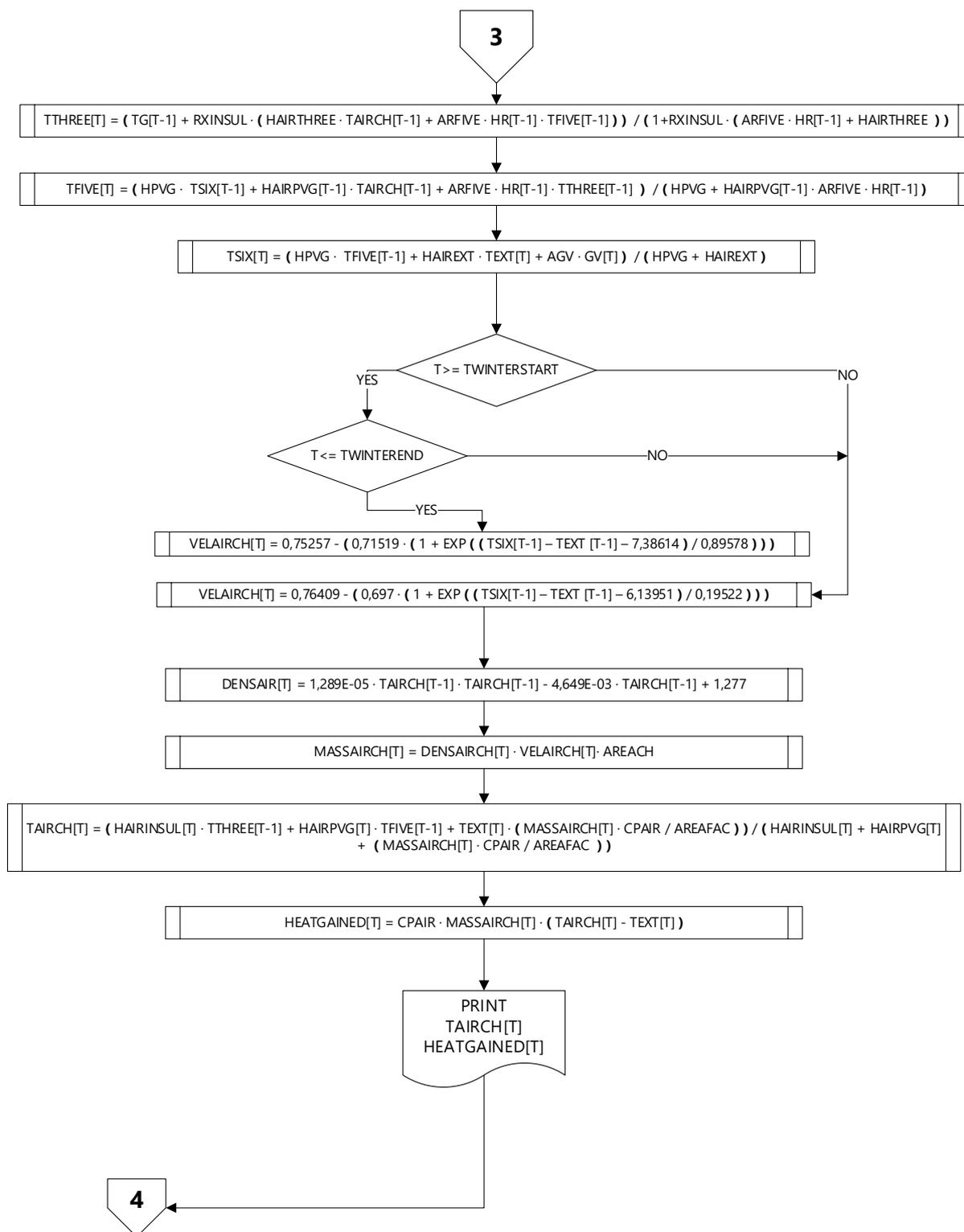


Figura 3.17 – Algoritmo para la implementación del modelo numérico en herramienta de cálculo computacional (página 3/3).

3.3.4. Validación del modelo numérico

3.3.4.1. Comprobación del modelo a partir de los datos de invierno

El modelo numérico es puesto a prueba, tomando como datos de entrada la temperatura superficial interior T_1 , la temperatura ambiente exterior T_{ext} , y la radiación solar incidente vertical G_v registrados durante el ensayo en condiciones de invierno.

La comparativa entre los valores calculados por el modelo numérico y los medidos experimentalmente durante este periodo para las temperaturas T_2 , T_3 , T_5 y T_6 puede apreciarse en la Figura 3.18. Se trata de las temperaturas superficiales de las diferentes capas de la solución. El error indicado corresponde a la diferencia entre el valor medido y el calculado, siendo el error medio, el promedio de todas estas diferencias en valor absoluto.

La comparativa entre los valores medidos experimentalmente y los calculados por el modelo para el flujo de aire en la cámara ventilada se muestran en la Figura 3.19. Se grafican tanto la evolución de la temperatura de aire en la cámara T_4 , como la potencia de ganancia térmica ($\dot{q}_{gain} [W]$) asociada a esta temperatura.

El modelo autorregula el caudal del aire en fachada de acuerdo al ajuste sigmoide de Boltzmann anteriormente descrito, e igualmente alterna de forma automática los valores de las conductancias convectivas en la cámara en función del nivel del caudal. La Figura 3.20 demuestra la sorprendente capacidad de dicha función de ajuste de Boltzmann de recoger la regulación del caudal de aire en la cámara.

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo tiene plena capacidad de reproducir los procesos de transferencia de calor que ocurren en la solución de fachada FVFF. Esta capacidad de modelado funciona tanto para los periodos soleados como los nocturnos o nublados. La utilización de dos valores de coeficientes de convección en función de cuál sea la superficie de la cámara que presenta mayor temperatura, ha permitido obtener este buen ajuste.

Las mayores diferencias entre temperaturas medidas y calculadas se presentan mayoritariamente en los periodos de baja temperatura. Se observa que el valor experimental es más frío que el calculado en los periodos nocturnos, como sucede por ejemplo en los resultados de la temperatura superficial exterior de la hoja de vidrios fotovoltaicos T_6 , y la temperatura del aire en la cámara ventilada T_4 . La causa de que el modelo no consiga recoger con mejor ajuste este enfriamiento, se debe a que experimentalmente no se ha medido el nivel de intercambio radiante entre la fachada y el ambiente nocturno más frío, sobre todo si el cielo nocturno está despejado. Esto puede mejorarse incluyendo un pirgeómetro de alta sensibilidad en la medida de la radiación vertical en fachada. De todas formas, este efecto no ha sido crítico pues la ganancia térmica total calculada para el periodo de ensayo ha sido tan solo un 1% menor que la obtenida experimentalmente.

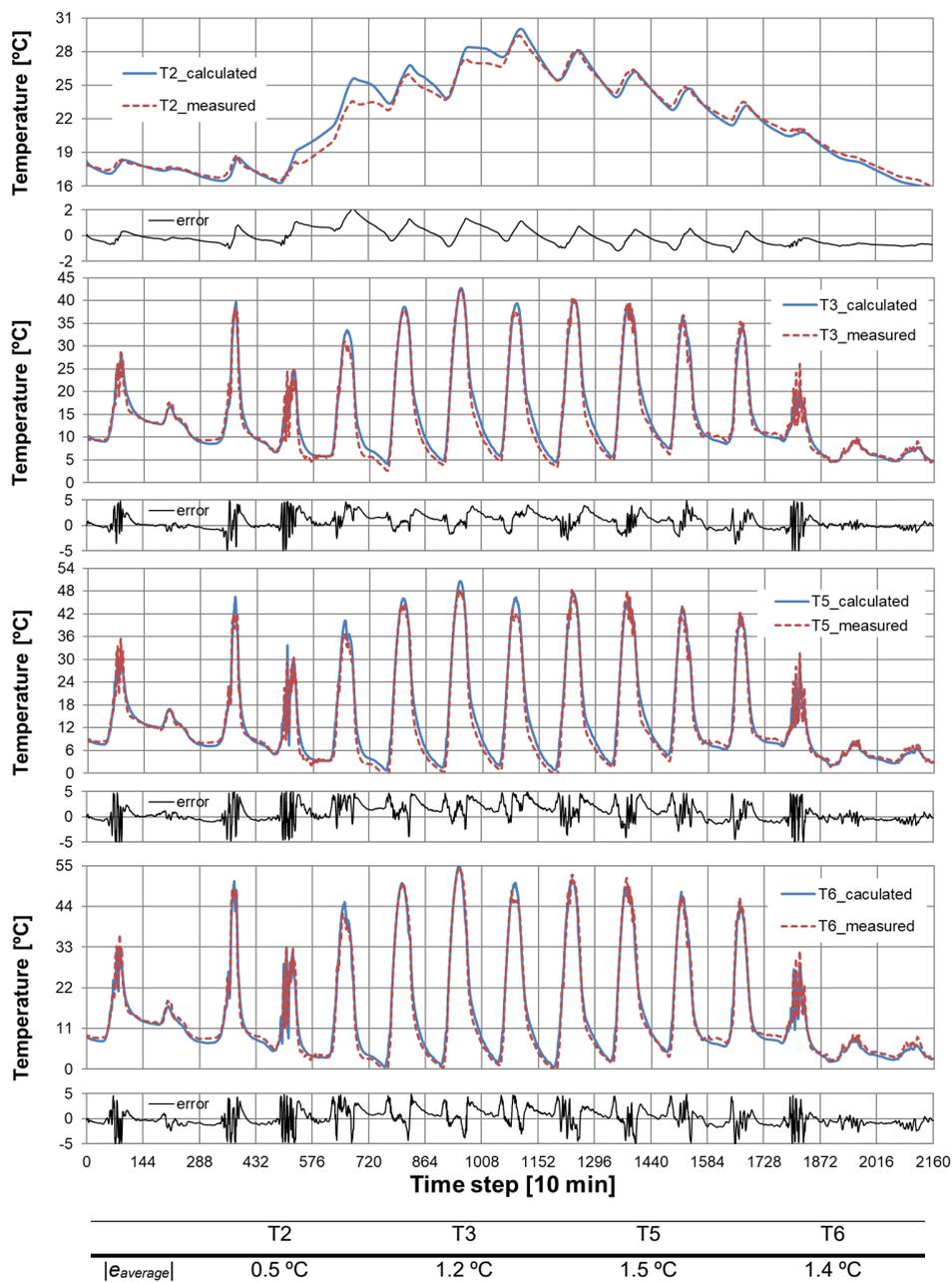


Figura 3.18 – Comparativa de valores medidos y calculados para las temperaturas T_2 , T_3 , T_5 y T_6 – invierno.

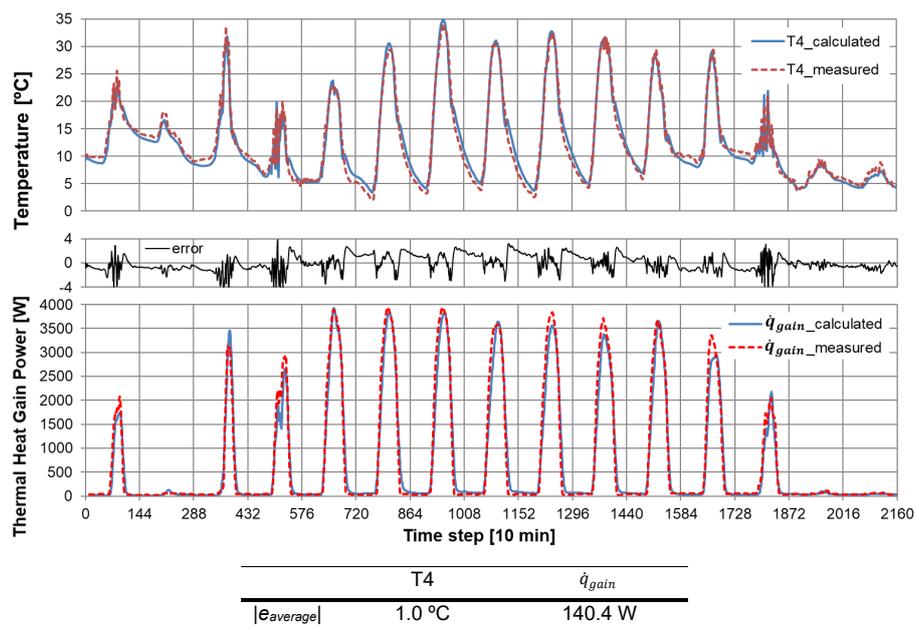


Figura 3.19 – Comparativa de valores medidos y calculados para las temperaturas T_2 , T_3 , T_5 y T_6 – invierno.

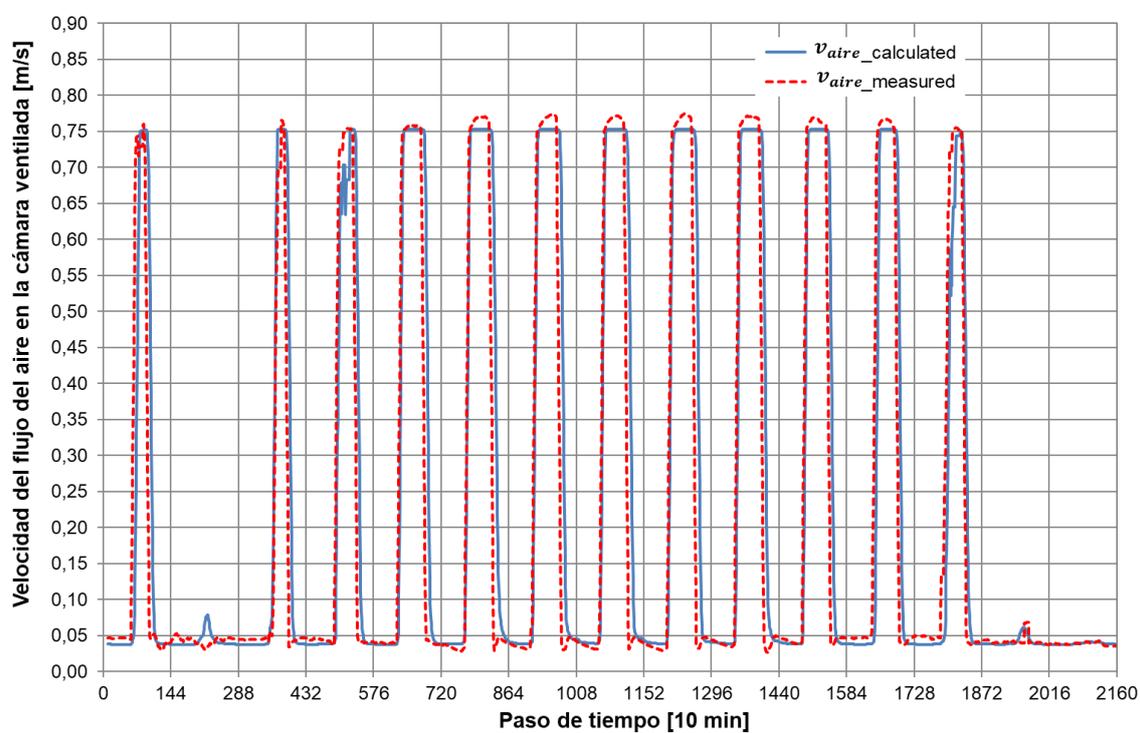


Figura 3.20 – Comparativa de la velocidad del flujo del aire en la cámara ventilada.

3.3.4.2. Validación del modelo con datos experimentales de verano

A partir de los datos experimentales, se detectó que en las condiciones de verano había una leve diferencia en la respuesta del caudal de aire en la cámara ventilada al tiro ejercido por el ventilador de extracción. En verano el aire tiene una densidad menor que en invierno, y por esta razón la velocidad obtenida en la cámara de aire para los dos niveles de funcionamiento del ventilador de extracción fue levemente mayor.

Por lo tanto, antes de poner a prueba el modelo predictivo de temperatura de cámara con los datos de verano, fue necesario determinar un nuevo ajuste sigmoide de Boltzmann para las condiciones de verano. A partir de los datos representados en la Figura 3.21 se obtiene la expresión de la ecuación (3.53). Aunque se comenta aquí, esta variación está incluida en el algoritmo que se presentó en el subapartado anterior, y ocurre para los meses de junio a septiembre.

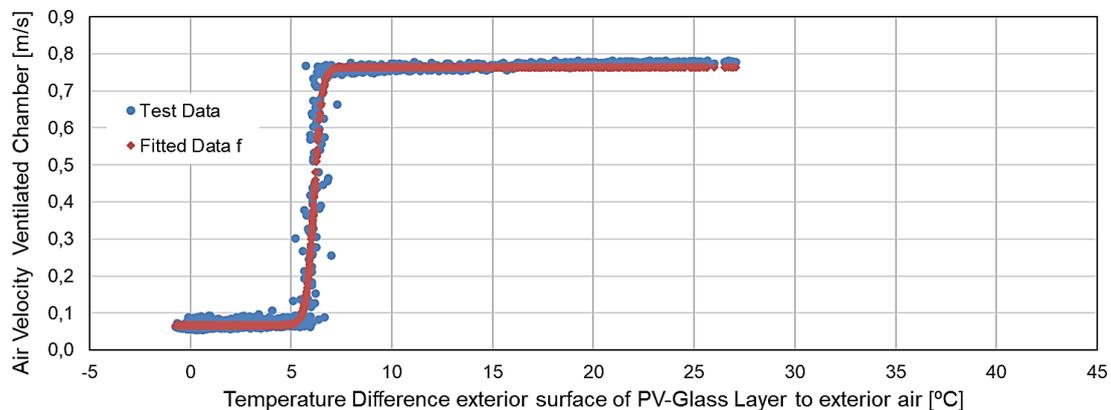


Figura 3.21 – Ajuste sigmoide de Boltzmann para la velocidad de aire en cámara durante el invierno.

$$f_{\text{verano}} = 0,76409 - \frac{0,697}{\left(1 + e^{\frac{\Delta T - 6,13951}{0,19522}}\right)} \quad (3.53)$$

La prueba del modelo numérico con los datos experimentales de verano produjo los resultados que se muestran en la Figura 3.22 y en la Figura 3.23, que son comparados con los correspondientes datos experimentales. El resultado obtenido demuestra que el modelo también es capaz de reproducir adecuadamente la respuesta térmica de la fachada en el periodo de verano. Las curvas de temperatura para los valores calculados y monitorizados varían de forma paralela con un gran ajuste, inferior al 15% para el 90% de los valores en todos los nodos. En cuanto a la ganancia térmica, se observa que el modelo ha subestimado en un 12,5% la energía total transferida al caudal de aire de la cámara ventilada durante el periodo de ensayo

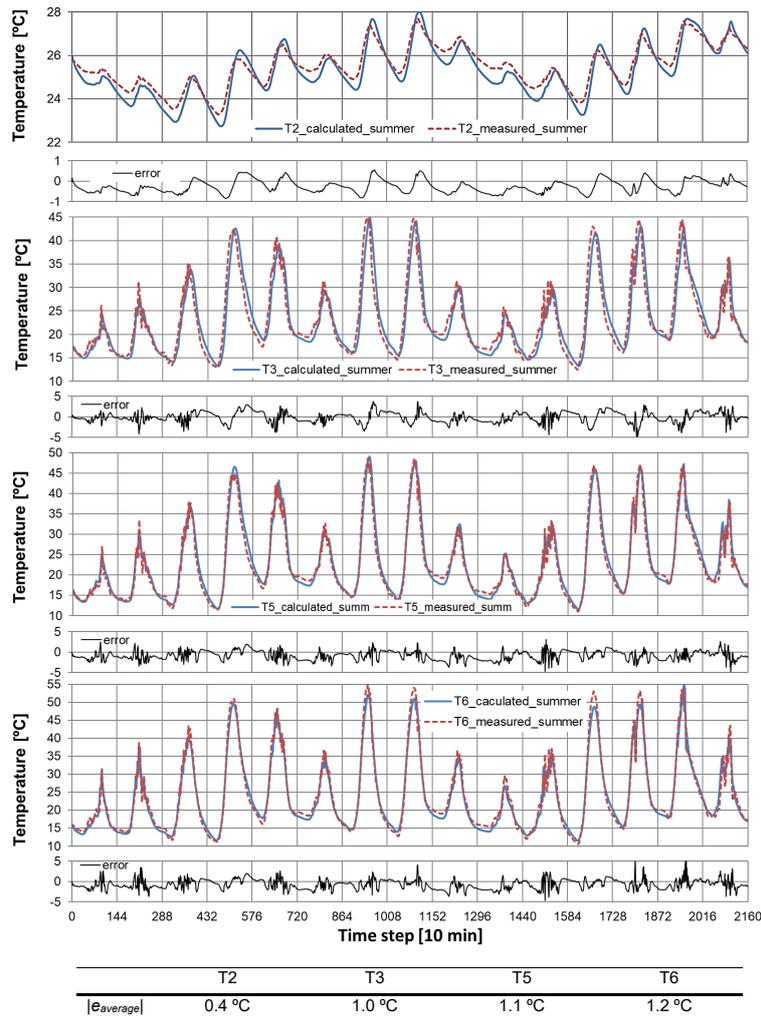


Figura 3.22 – Comparativa de valores medidos y calculados para las temperaturas T_2 , T_3 , T_5 y T_6 – verano..

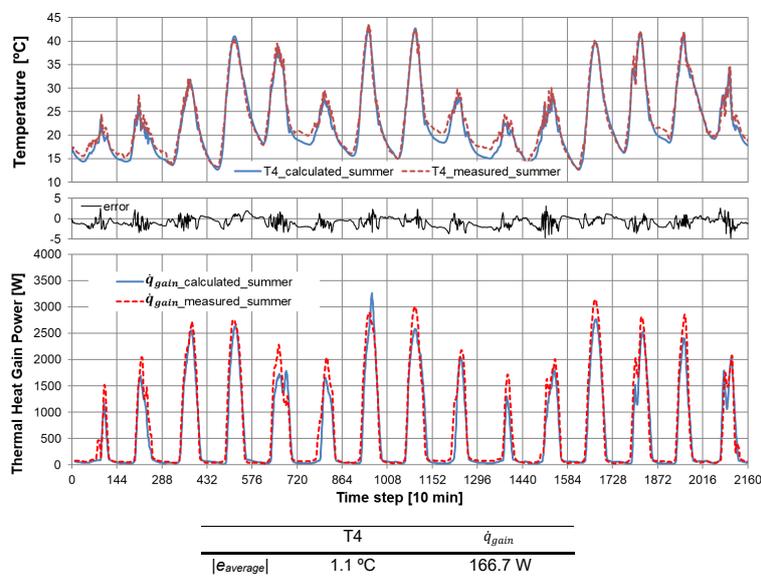


Figura 3.23 – Comparativa de valores medidos y calculados para las temperaturas T_2 , T_3 , T_5 y T_6 – invierno..

3.4. Conclusiones del capítulo.

Se ha obtenido un modelo numérico que combina discretización de diferencias finitas y componentes de un modelo RC previamente solucionado mediante la herramienta LORD, capaz de reproducir con fidelidad la evolución de las temperaturas y caudales de aire registrados experimentalmente en el ensayo PASLINK de la muestra de FVFF.

El modelo obtenido se ha mostrado estable y potente siendo capaz de ajustar simultáneamente las temperaturas nodales consideradas en la totalidad de sección de la fachada, tanto en condiciones de invierno como de verano, ya se trate de periodos soleados o de periodos nocturnos o nublados. La mayor desviación de ajuste ha sido en la temperatura de la cara interior de la hoja fotovoltaica con un máximo de $|e_{medio}| = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que la menor ha sido en la interface entre el muro y la capa de aislamiento con tan solo $|e_{medio}| = 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Por su parte, la temperatura que alcanza el aire en la cámara ventilada y que es el resultado de mayor interés para este estudio, mostro una desviación inferior a $|e_{medio}| = 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Este modelo numérico que ha sido obtenido y validado a partir de los datos experimentales del ensayo PASLINK, ha sido creado de tal forma que funciones como un modelo predictivo, que permita determinar la temperatura del aire de una FVFF en cualquier ubicación y orientación. Para ello es suficiente con acotar el modelo a partir de la temperatura interior T_{int} , emplear valores estándar para las conductancias H_{int} y H_{ext} basados en los valores referidos por la norma ISO 6946[157] para las resistencias térmicas interior y exterior de paredes planas, y usar datos climatológicos locales para T_{ext} y G_v . El propio modelo predice los valores de temperatura superficial en la hoja exterior, que junto con el valor de T_{ext} le permite autorregular el caudal y los coeficientes convectivos en cámara. Por su parte la temperatura interior T_{int} puede limitarse simplemente a valores de consigna durante periodos de tiempo determinados, o directamente una temperatura dinámica como la que se obtiene de una simulación de edificio.

El modelo obtenido es una herramienta de cálculo fácilmente programable en cualquier lenguaje de ordenador capacitado para tal fin, o incluso en una hoja de cálculo, como lo demuestra el que haya sido posible estructurarlo en forma de algoritmo.

Aspectos considerados en el desarrollo del modelo, tales como el espesor de cámara, tipo de panel fotovoltaico y niveles de caudal de extracción son muy específicos para el diseño de FVFF analizado. Futuros estudios pueden tener como objetivo el parametrizar alguna de estas variables, basándose en la metodología aplicada en el presente estudio.

CAPITULO 4

Análisis a escala de edificio de la FVFF

RESUMEN

El análisis a escala de edificio de la FVFF corresponde a la simulación energética de un modelo de edificio tomado como caso de estudio. Se describe con detalle el edificio, el cual se ha basado en los criterios establecidos por el Código Técnico de la Edificación, tanto en envolvente como en uso. Igualmente se da relevancia al tratamiento de las instalaciones de calefacción y ACS basadas en bombas de calor aerotérmicas correspondientes a modelos comerciales reales. El capítulo finaliza con una comparativa de los resultados de simular el modelo de edificio con y sin implementar la solución FVFF. De esta manera se determina el impacto de la FVFF en el ahorro energético dando relevancia a la estrategia encontrada para optimizar la transferencia de la energía térmica al edificio. Dicha estrategia consiste en que a partir de una temperatura de consigna interior adaptativa, se convierte al propio edificio en un acumulador térmico de los periodos de mayor generación energética en fachada.

4.1. Introducción.

El análisis a escala de edificio realizado en este Capítulo tiene los siguientes objetivos:

- Comparar el comportamiento energético del edificio, sin y con FVFF en su orientación sur.
- Definir una estrategia que permita aplicar el concepto de edificio como acumulador térmico (Building as battery) al modelo de edificio con FVFF.
- Determinar el impacto que tiene el uso del edificio como acumulador térmico en la reducción del consumo energético y de ACS del edificio, valorando si esta estrategia funciona como una herramienta de optimización energética.
- Evaluar en términos generales la propuesta de usar una FVFF como elemento de apoyo a la Bomba de Calor en un edificio del tipo ECCN.

Tal y como lo manifiestan los anteriores objetivos, el presente capítulo describe el análisis realizado para comprobar si el potencial de captación térmico demostrado por la FVFF en la etapa de caracterización experimental tiene un aprovechamiento práctico en el sistema edificio a través de una bomba de calor. Para ello se recurre a una herramienta BES (Building Energy Simulation) reconocida como lo es el software DesignBuilder® V. 6.1.13 [158][159]. En esta herramienta es posible vincular una bomba de calor aire-agua con la ganancia térmica de la FVFF así como la simulación de los efectos de inercia térmica propios de un suelo radiante.

Vincular la bomba de calor con la FVFF significa que la temperatura del aire que intercambia calor con el evaporador de la bomba en cada paso de tiempo de la simulación, sea la obtenida por el modelo térmico de la FVFF. Otro aspecto a cumplir, es que la cantidad de aire que demanda el evaporador de la bomba se corresponda con el caudal de aire extraído de la cámara de fachada.

El modelo de edificio utilizado como ejemplo corresponde a un edificio exento residencial de 54 viviendas ubicado en la ciudad de Madrid, con orientación norte-sur para sus fachadas principales.

El apartado 4.2 describe en detalle las características constructivas y de uso del edificio. Estas se corresponden con lo estipulado en el Código Técnico de la Edificación CTE, y por lo tanto el modelo de edificio se ajusta a criterios de edificio de consumo casi nulo ECCN.

En este mismo apartado 4.2 se exponen los demás criterios y características requeridos para la definición del modelo del edificio de referencia. En lo que respecta a las instalaciones de calefacción y ACS se han dedicado esfuerzos en incorporar al programa de simulación bombas de calor reales disponibles en el mercado. Se quería que esta definición fuese hecha con la mayor fidelidad posible a las propiedades de catálogo declaradas por el fabricante. De igual manera, se ha prestado atención a la definición de superficie de FVFF en función del caudal que esta puede evacuar y el requerido por los evaporadores de las bombas.

Las características del modelo de edificio con FVFF en su orientación sur son expuestas en el apartado 4.3. También es expuesta la estrategia establecida para obtener un comportamiento del edificio como acumulador térmico, recurriendo a una consigna de temperatura interior

variable. Esta queda condicionada a los niveles de aprovechamiento solar de la FVFF por lo que ha sido denominada “Temperatura adaptativa”.

El comportamiento energético del edificio se ha simulado para tres casos, tal y como se indica en el apartado 4.4: un caso de referencia sin fachada ventilada, y los otros dos casos con FVFF en la orientación sur. Uno de estos usa la misma consigna de temperatura interior que el caso de referencia y el otro usa la “Temperatura adaptativa” como consigna. Todos los casos han sido simulados para un año entero mediante el mencionado software DesignBuilder®.

La composición del cerramiento de la fachada sur se corresponde con la del ensayado y modelado en los capítulos anteriores. Tal y como recomienda Catto Luchino et al[101], tener elementos de doble fachada validados con datos experimentales da mayor certidumbre a su simulación en herramientas BES.

El apartado de resultados de este capítulo constituye el puerto de llegada de todo el trabajo realizado a lo largo de esta Tesis Doctoral. Por una parte confirma la hipótesis del potencial de aprovechamiento energético que se obtiene al usar una FVFF como fuente de calor integrable en edificios a través de instalaciones de bomba de calor; y por otra postula la necesidad de hacer tal integración con estrategias de acumulación. En el caso de estudio, esto se logró mediante el aprovechamiento de la inercia térmica del propio edificio definiendo una temperatura de consigna denominada “temperatura de condigna adaptativa”.

4.2. Descripción del modelo de Edificio de referencia

El edificio seleccionado como caso de estudio se inspira en una promoción de edificio residencial real, destinado a viviendas de protección oficial. Se trata de un bloque exento de 54 viviendas agrupadas en tres portales, con planta baja destinada a locales comerciales y porches de comunicación entre portales, planta sótano de garajes y trasteros, y seis alturas de plantas residenciales.

A continuación, se describen en detalle todos los parámetros de interés para la definición del modelo de edificio.

4.2.1. Geometría y localización

Como se ha indicado, es un edificio exento, con planta sótano de garajes y trasteros, planta baja de locales comerciales y acceso a portales, y seis plantas residenciales. Estas últimas constan de nueve viviendas por planta, tres por cada portal. De la Figura 4.1 a la Figura 4.3 se muestran diferentes vistas generales del edificio.



Figura 4.1 – Vista suroeste del edificio de referencia, incluyendo la planta sótano.



Figura 4.2 – Vista axonométrica noroeste del edificio de referencia, plantas sobre el terreno.



Figura 4.3 – Vista axonométrica sureste del edificio de referencia, plantas sobre el terreno.

La distribución arquitectónica en cada una de las seis plantas residenciales es idéntica, y se puede apreciar en la Figura 4.4. En esta figura se indican los tres portales que conforman el bloque de edificio, numerados como 1, 3 y 5.



Figura 4.4 – Distribución en planta del proyecto arquitectónico del bloque de edificio.

Esta distribución ha sido representada en el modelo de simulación tal y como se muestra en la Figura 4.5. Como se puede apreciar cada vivienda es considerada como una sola zona térmica acondicionada y cada uno de los tres portales tiene un distribuidor no acondicionado. En cada portal se tienen dos viviendas que son pasantes norte-sur y una vivienda central con solo fachada sur. Las viviendas pasantes representan a las de tres dormitorios con una superficie interior de 85,43/86,17 m². En particular, las que están ubicadas en los laterales del bloque cuentan además con una tercera fachada de orientación este u oeste según corresponda. Las viviendas centrales representan a las de dos dormitorios con una superficie de 61,01 m².



Figura 4.5 – Representación en el modelo de simulación de la distribución de viviendas.

En cuanto a la localización, el caso de estudio se ha ubicado en la ciudad de Madrid. Por una parte sus condiciones de invierno corresponden a la severidad climática mayoritaria de las provincias de la península, y por otra parte, ilustra la aplicación del modelo numérico

desarrollado para la FVFF en un emplazamientos diferente al del ensayo experimental. Los datos meteorológicos empleados en la simulación, han sido los datos sintéticos característicos para un año tipo, generados a partir de las lecturas de la estación meteorológica ubicada en Barajas. Este archivo meteorológico se encuentra incorporado en el propio software DesignBuilder, el que a su vez lo toma de la base meteorológica mundial desarrollada por la herramienta Meteonorm[160].

Como datos principales, indicar que el sitio de emplazamiento del edificio estaría a una latitud de 40,45° N, una longitud de 3,55° O, y una altitud de 582 m sobre el nivel del mar. Se han adoptado por defecto todos los datos característicos del sitio, exceptuando la temperatura de agua de red, la cual se describe con detalle en el posterior subapartado dedicado a describir las instalaciones.

4.2.1.1. Composición de los cerramientos

En la Tabla 4.1 se describen las propiedades y espesores de los diversos materiales que componen las soluciones constructivas del edificio. Las propiedades están basadas en referencias de catálogo, de la base de materiales del propio software o de publicaciones. De estas, las variables más relevantes para la simulación son las de conductividad y espesor[161].

Al tomar como referencia un proyecto de edificio real, las soluciones constructivas definidas para este caso de estudio se corresponden con soluciones de uso habitual en proyectos bajo la normativa actual. Específicamente, proyectos que cumplen con los criterios del Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación.

Para asegurar la representatividad del modelo, la fachada sur fue definida con una composición idéntica a la empleada en la fase experimental, adaptándola al caso de edificio de referencia y al de edificio con FVFF.

Así, se tiene que la única diferencia a nivel de cerramientos entre el edificio de referencia y el edificio con fachada FVFF, es el remate exterior de la fachada sur. El edificio de referencia está definido con un mortero exterior que recubre la capa de aislamiento, una solución tipo SATE (sistema de aislamiento térmico por el exterior). Este tipo de solución suele ser habitual en proyectos de rehabilitación, aunque recientemente también está siendo incluida en proyectos de nueva construcción. Por su parte, el edificio con fachada FVFF aplica una solución de fachada ventilada tal y como la estudiada en los capítulos anteriores, con una cámara de 10 cm y una hoja exterior de vidrios fotovoltaicos (Otros criterios tenidos en cuenta a la hora de definir el modelo FVFF se describen en el apartado 4.3).

Tabla 4.1 – Composición de las soluciones constructivas en el Modelo de referencia

Cerramiento	Espesor [m]	U [W/m ² ·K]	Capas desde el exterior al interior/arrriba hacia abajo				
			Descripción	espesor [m]	λ [W/m·K]	C_p [J/kg·K]	ρ [kg/m ³]
Fachada Sur	0,245	0,51	Mortero de cemento	0,01	0,72	840	1860
			Lana Mineral	0,05	0,037	800	22
			Mortero de cemento	0,01	0,72	840	1860
			Bloque de Hormigón	0,155	0,407	1000	1397
			Revoco de yeso	0,02	0,81	840	1680
Fachada norte	0,295	0,285	Ladrillo Caravista	0,115	0,65	1000	1140
			Mortero de cemento	0,015	0,88	896	2800
			PUR proyectado	0,04	0,025	650	35
			Cámara de aire	0,05	(Resistencia Térmica: 0,11 m ² K/W)		
			Poliestireno extruido XPS	0,06	0,04	840	30
			Placa de cartón yeso	0,015	0,25	1000	900
Fac. Este/Oeste.	0,265	0,28	Placa de hormigón armado prefabricado	0,1	0,62	1000	1200
			Poliuretano Proyectado	0,04	0,026	650	35
			Cámara de aire	0,05	(Resistencia Térmica: 0,11 m ² K/W)		
			Panel de lana mineral	0,06	0,04	840	30
			Placa de cartón yeso	0,015	0,25	1000	900
			Suelo Cerámico	0,015	2,30	1000	2500
Forjado entre plantas	0,485	0,387	Mortero de cemento	0,045	0,55	1000	1200
			Circuito de suelo radiante	-	-	-	-
			Poliestireno extruido XPS	0,05	0,036	1470	32
			Hormigón Armado	0,36	2,0	837	2243
			Revoco de yeso	0,015	0,4	1000	1000
			Suelo Cerámico	0,015	2,30	1000	2500
Forjado sobre planta baja	0,530	0,29	Mortero de cemento	0,05	0,55	1000	1200
			Circuito de suelo radiante	-	-	-	-
			XPS	0,10	0,036	1470	10
			Hormigón Armado	0,35	2,0	837	2243
			Revoco de yeso	0,015	0,4	1000	1000
			Grava	0,02	1,83	712	2200
Cubierta plana	0,565	0,296	XPS Poliestireno extruido	0,1	0,036	1470	10
			Recrecio de mortero	0,08	0,27	100	900
			Hormigón armado	0,08	1,15	1000	1800
			Revoco de yeso	0,015	0,4	1000	1000
			Hormigón armado	0,35	2,5	1000	2400
Muros en contacto con terreno	0,505	1,55	Cámara de aire no ventilada	0,07	(Thermal resistance: 0,18 m ² K/W)		
			Fábrica de ladrillo	0,07	0,469	1000	930
			Revoco de cemento	0,015	2,0	1000	2400
Ventanas	0,08	1,94	Área ratio [%]		U [W/m ² ·K]		
			4 mm vidrio claro/16 mm cámara / 6 mm bajo emisivo.	78	1,50		
			Carpintería de Aluminio con rotura de puente térmico poliamida 20mm.	22	2,88		

4.2.2. Uso del edificio

4.2.2.1. Horarios de ocupación y demandas/cargas

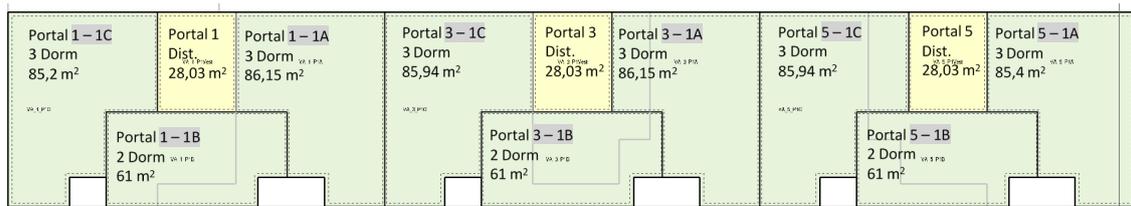
Este aspecto adopta parámetros de las condiciones operacionales y perfiles de uso del CTE (ver B.1.1 del Anexo B) o indicadas en la herramienta de certificación oficial HULC. En la Tabla 4.2 se resumen los valores establecidos para los parámetros más relevantes en el uso del edificio, así como su fuente o justificación.

Tabla 4.2 – Parámetros definidos para el uso y ocupación del modelo del edificio

Parámetro	Magnitud	Valor	Descripción
Densidad de ocupación	<i>Personas/m²</i>	0,05	Redondeado, a partir de la comprobación de la ocupación mínima establecida en la tabla a-AnejoF DB-HE CTE 2020 y de las correspondientes superficies de viviendas. Consultar el posterior apartado de ACS y también B.1.2 del Anexo B.
Programación de la ocupación	Porcentaje respecto de la máxima ocupación de zona conforme a la densidad de ocupación	Para todo el año. De lunes a viernes 00 – 07h 100% 07 – 15h 25 % 15 – 23h 50% 23 – 24h 100% Sábado y Domingo 00 – 24h 100%	Porcentaje de ocupación respecto al máximo de zona según CTE. Extractado del programa HULC.
Condiciones Metabólicas	<i>W/persona</i>	117,2	Tasa metabólica por persona para condiciones de residencial en reposo.
Vestimenta	<i>clo</i>	1 – Invierno 0,5 – Verano	Fundamentos Técnicos Herramienta Unificada Lider-Calener
Densidad de potencia miscelánea de equipos internos	<i>W/m²</i>	4,4 – valor máximo Para todo el año, variación @ máx: De lunes a domingo 00 – 07h 10% 07 – 18h 30 % 18 – 19h 50% 19 – 23h 100% 23 – 24h 50%	Equipos e iluminación en residencial conforme a condiciones operacionales CTE-DB HE. Consumo atribuido a electricidad.
Iluminación	<i>W/(100 lux · m²)</i>	3,4	Con idéntica programación que en el anterior. Luminaria superficial, 0,72 fracción radiante, 0,18 fracción visible y 0,10 fracción convectiva

4.2.2.2. Demanda de ACS

El punto de partida para definir el consumo de agua caliente sanitaria es el Anejo F del CTE DB-HE (Ver apartado B.1.2 del Anexo B). Se indica que para una temperatura de 60 °C ha de considerarse un consumo de 28 *litros/día · persona*. Para establecer el total de la ocupación, este mismo anejo en su “tabla a”, establece un número mínimo de personas en función del número de dormitorios de la vivienda; en su “tabla b” un factor de centralización para promociones de viviendas multifamiliares. Para el número y tipo de viviendas del modelo se obtiene la ocupación indicada en la Figura 4.6.



Portal 1					Portal 3					Portal 5				
Mano	Sup. [m ²]	Dorm.	Pers.	ACS [litros/día]	Mano	Sup.	Dorm.	Pers.	ACS [litros/día]	Mano	Sup.	Dorm.	Pers.	ACS [litros/día]
A	86,15	3	4	112	A	86,15	3	4	112	A	85,40	3	4	112
B	61,00	2	3	84	B	61,00	2	3	84	B	61,00	2	3	84
C	85,20	3	4	112	C	85,94	3	4	112	C	85,94	3	4	112
Total Portal	232,35		11	308		233,09		11	308		233,34		11	308

Superficie interior Total Acondicionada [m ²]	4186,68
Ocupación Total [personas]	198
Densidad de ocupación [personas/m ²]	0,047 ~ 0,05
Consumo Total Bruto ACS [litros/día]	5544
Factor de centralización por N° de viviendas 51 ≤ N ≤ 75 [adimensional]	0,80
Consumo Total Neto ACS tras factor de centralización [litros/día]	4435,20

Figura 4.6 – Determinación de ocupación y consumo ACS a partir de la distribución interior.

Este consumo no es constante sino que se proporciona fraccionadamente a lo largo del día mediante una programación igualmente establecida en el documento básico, en la “tabla c” del Anexo D (ver B.1.3 del Anexo B), traspuesto al modelo mediante el fichero de programación mostrado en la Figura 4.7.

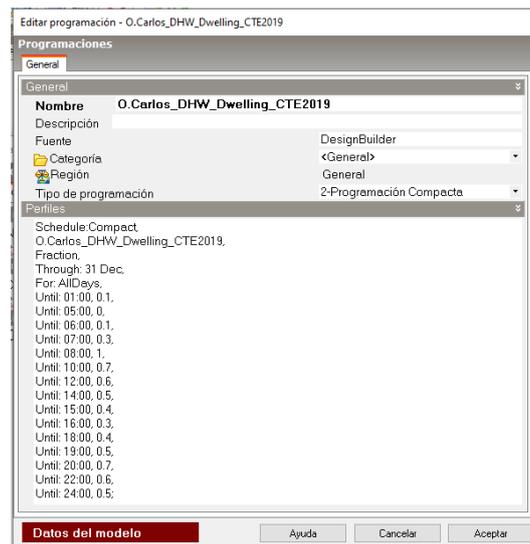


Figura 4.7 – Perfil horario para el consumo de ACS.

4.2.3. Instalaciones

Con el objetivo de diferenciar claramente el aprovechamiento del aporte energético de la fachada FVFF tanto en la calefacción del edificio como en el ACS, se ha provisto al modelo de edificio de dos circuitos independientes de agua caliente, uno para calefacción y otro para ACS. Cada uno de estos dos circuitos se ha provisto de una bomba de calor aerotérmica con propiedades correspondientes a modelos comerciales actualmente existentes en el mercado.

Cuando la fuente energética del circuito de calefacción es exclusivamente una bomba de calor, se requiere que el sistema de distribución del circuito funcione a baja temperatura. Es por ello que se ha definido un sistema de suelo radiante como el dispositivo terminal de suministro de calor a las zonas acondicionadas. En este sentido, también resulta conveniente separar el circuito de calefacción del circuito de ACS pues se favorece el rendimiento de la bomba de calor dedicada a la calefacción.

Finalmente, las instalaciones de acondicionamiento del ambiente interior las completa un sistema de ventilación mecánica de doble flujo con recuperación de calor. Actualmente, hacer uso de este tipo de ventilación se está convirtiendo en una especie de norma en el diseño de edificios de consumo casi nulo. Cabe reseñar que no necesariamente es así para todos los casos, y en ocasiones la energía requerida para mover el doble de masa de aire que un sistema de simple flujo tiene un coste energético/económico superior a lo recuperado. Cuando esto sucede, resulta más eficiente un simple flujo de caudal variable, activado en función del nivel de ocupación a través de indicadores indirectos como el CO₂. Hacer este tipo de comprobación excede el alcance del presente estudio, manteniendo por tanto el sistema de ventilación VM-DFRC estándar definido por la propia herramienta de simulación, con una eficiencia de recuperación del 70%, un valor muy conservativo respecto a lo disponible comercialmente.

En la Figura 4.8 se muestra un esquema global de las instalaciones del modelo de edificio para calefacción, ventilación y ACS. Como se aprecia claramente, las dos bombas de calor constituyen sistemas independientes. En los siguientes subapartados se describe con más detalle la definición de cada uno de estos tres componentes.

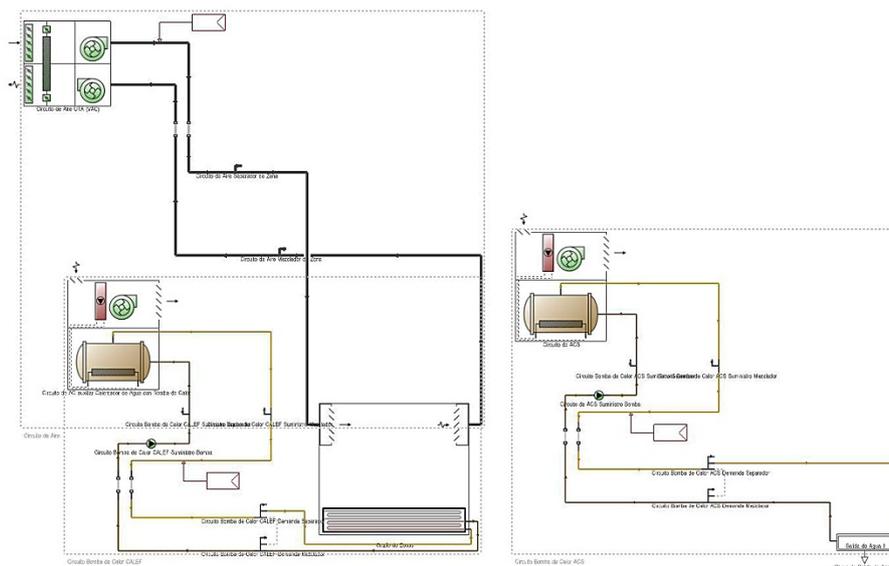


Figura 4.8 – Esquema global de las instalaciones del modelo de edificio para calefacción, ventilación y ACS.

4.2.3.1. Instalación de calefacción mediante bomba de calor aire-agua y suelo radiante

En la Figura 4.9 se aprecia la planta de agua caliente definida para calefacción con la representación propia del software DesignBuilder. La parte de suministro la compone la bomba

de calor aire-agua que se detalla seguidamente, mientras que la parte de demanda la constituyen 54 zonas HVAC, una por cada vivienda mediante su correspondiente sistema de suelo radiante.

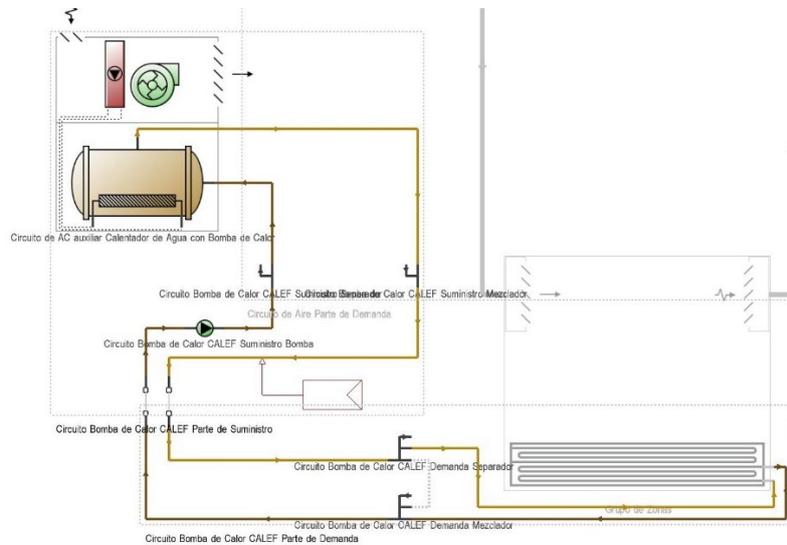


Figura 4.9 – Circuito de agua caliente para calefacción de zona..

4.2.3.1.1. Características de la Bomba de Calor para Calefacción.

La bomba de calor seleccionada para calefacción corresponde al modelo AquaSnap 30 RQS-120 de la marca Carrier, que emplea refrigerante R410A. Su capacidad calorífica nominal es de 117 kW y la variación de su rendimiento en modo calefacción con la temperatura exterior, en este caso de bulbo húmedo, se ilustra en la Figura 4.10. Por su parte la variación de su capacidad calorífica (Q_h) es indicada en la Figura 4.11. Estas gráficas han sido extractadas a partir de los datos declarados por el fabricante en el correspondiente catálogo de la máquina, el cual puede consultarse en el apartado B.2.1. del Anexo B.

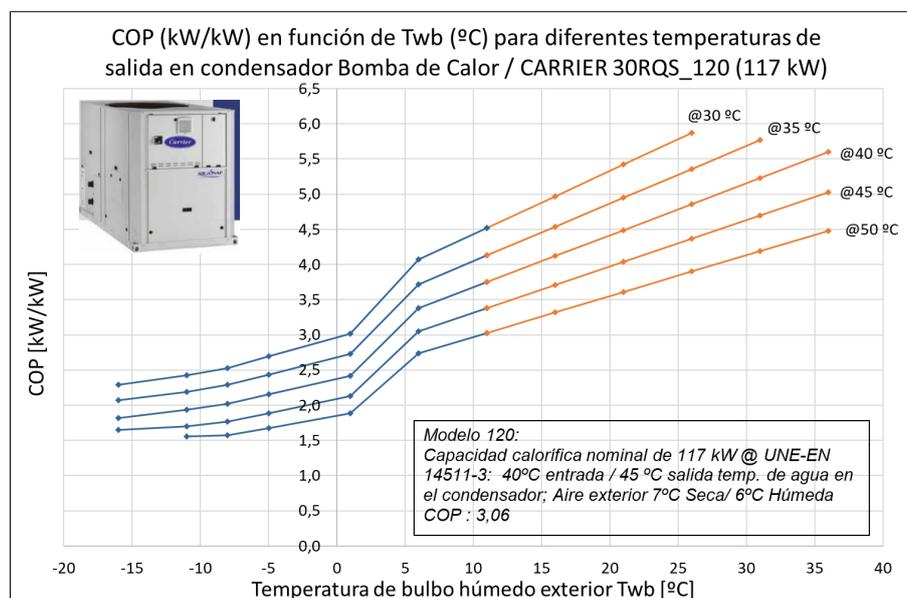


Figura 4.10 –Variación del COP para diferentes temperaturas de aplicación de la bomba de calor para calefacción.

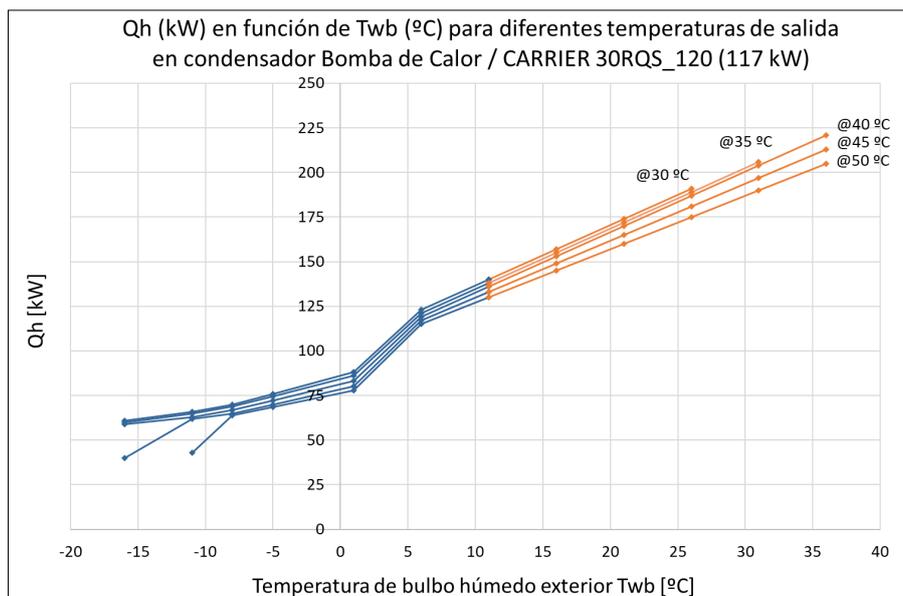


Figura 4.11 –Variación de la capacidad calorífica Q_h para diferentes temperaturas de aplicación de la bomba de calor para calefacción.

4.2.3.1.2. Definición de la bomba Carrier 30RQS-120 en DesignBuilder.

El elemento que representa la bomba de calor en Designbuilder consta fundamentalmente de tres componentes que son el evaporador, los ventiladores y el condensador ligado a un tanque de almacenamiento. De estos tres, es fundamentalmente en el evaporador donde se definen las propiedades extraídas de catálogo del modelo comercial. En la Tabla 4.3 se listan las principales propiedades que fueron definidas para la bomba de calor de calefacción en el modelo, mientras que en el apartado B.3.1 del Anexo B se exponen más detalles de este componente.

Tabla 4.3 – Parámetros más relevantes en la definición de la bomba de calor para Calefacción.

Parámetro	Magnitud	Valor	Descripción
Temperatura de salida del agua del condensador	°C	35 Programada constante para todo el año	Es la temperatura objetivo del calentamiento de agua por parte de la bomba de calor. En el componente DesignBuilder es denominada “consigna de temperatura del compresor”
Aire de entrada	Propiedades psicrométricas del aire	Solo aire exterior	Indica que el evaporador está ubicado en el exterior y por tanto trabajará con las condiciones instantáneas del aire recogidas en el fichero meteorológico del sitio. Este es uno de los factores que cambia en el edificio con FVFF, tal y como se expone más adelante.

Tanque calentador del agua	m^3	0 (0,038)	Se omite tanque de acumulación en la bomba de calefacción. Sin embargo por temas de estabilidad numérica el software requiere un volumen mínimo, indicado entre paréntesis, que para efectos prácticos opera como tanque nulo.
Capacidad de calefacción nominal	W	117000	Correspondiente al modelo 120
CoP Nominal	kW/kW	3,06	Correspondiente al modelo 120
Temperatura nominal de bulbo seco. Aire que entra al evaporador	$^{\circ}C$	7	De acuerdo a las condiciones en que se han determinado las propiedades nominales de la Bomba 30RQS: UNE-EN 14511-3.
Temperatura nominal de bulbo húmedo. Aire que entra al evaporador	$^{\circ}C$	6	De acuerdo a las condiciones en que se han determinado las propiedades nominales de la Bomba 30RQS: UNE-EN 14511-3.
Temperatura nominal del agua que entra al condensador.	$^{\circ}C$	40	De acuerdo a las condiciones en que se han determinado las propiedades nominales de la Bomba 30RQS: UNE-EN 14511-3.
Potencia de la bomba de agua del condensador.	W	150	
Fración de calor de la bomba del condensador al agua	$[-]$	0,2	
Otras consideraciones	-	-	- Potencia de la bomba del condensador incluida en el COP nominal. - Potencia del ventilador del evaporador incluida en el COP nominal. - Calor de la bomba del condensador incluido en la capacidad nominal de calefacción y el COP nominal.

Los datos de catálogo para el rendimiento de la bomba de calor y que han sido representados en las anteriores gráficas de COP y Q_h , constituyen la información de partida para crear curvas polinómicas de rendimiento compatibles con EnergyPlus, que es el motor de cálculo del programa DesignBuilder. Para conseguir estas curvas DesignBuilder cuenta con una herramienta generadora de curvas descrita en el apartado B.3.2 del Anexo B. Las curvas de rendimiento obtenidas para la capacidad de calefacción y el COP de la bomba de calor de Calefacción se muestran en la Figura 4.12 y en la Figura 4.13 respectivamente.

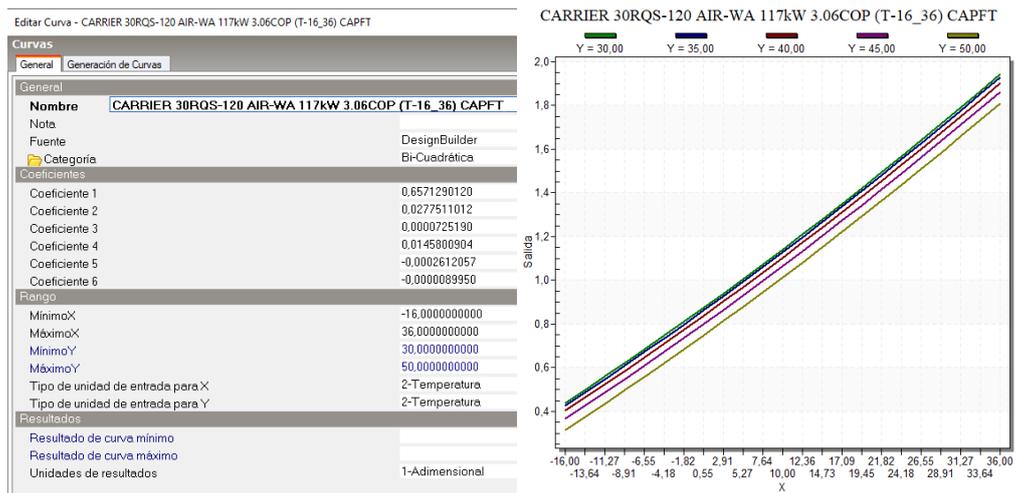


Figura 4.12 – Curva de capacidad de calefacción de la bomba Carrier 30RQS-120 en función de la temperatura de bulbo húmedo exterior en formato compatible con EnergyPlus

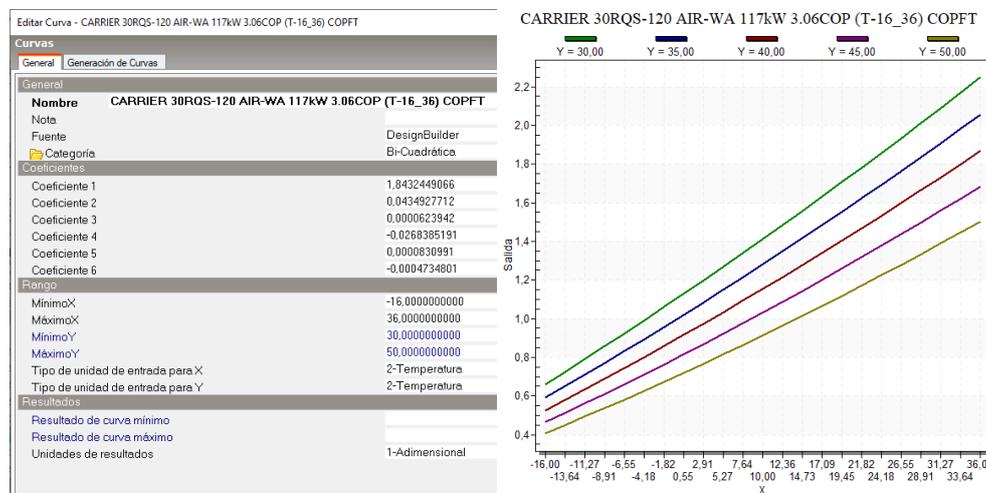


Figura 4.13 – Curva de COP de la bomba Carrier 30RQS-120 en función de la temperatura de bulbo húmedo exterior en formato compatible con EnergyPlus

Finalmente, cabe comentar que el programa de simulación contempla el funcionamiento a carga parcial aplicando un factor de reducción simple directamente proporcional al nivel de carga instantáneo respecto a la capacidad nominal.

4.2.3.1.3. Propiedades del suelo radiante.

En DesignBuilder es posible definir el suelo radiante indistintamente como una superficie radiante o como un suelo radiante como tal. El componente de superficie radiante ha sido incorporado en versiones recientes del programa, y además de permitir definir superficies radiantes diferentes al suelo, también es capaz de ser configurada como superficie refrescante. Asimismo es un componente que permite utilizar una posible programación variable de consigna de temperatura, algo que resultará de gran utilidad en la definición del edificio con FVFF. Por ello, en las imágenes esquemáticas para el suelo radiante que son mostradas a lo largo del presente capítulo capturadas desde el software de simulación (Figura 4.14), este suelo tiene la representación propia de una superficie radiante, pero con el circuito refrigerante anulado.

Los parámetros más relevantes del sistema de suelo radiante se muestran en la Tabla 4.4.

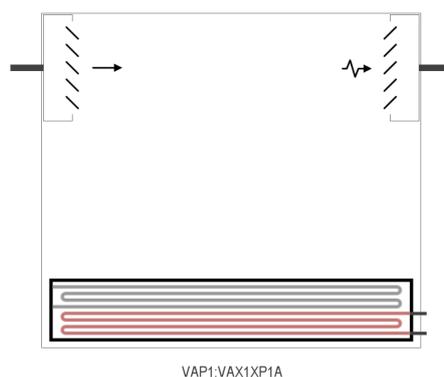


Figura 4.14 – Representación en DesignBuilder de una de las zonas acondicionadas HVAC con rejillas de ventilación y suelo radiante.

Tabla 4.4 – Parámetros más relevantes en la definición del suelo radiante.

Parámetro	Magnitud	Valor	Descripción
Tipo de flujo en el circuito	m^3/s	Flujo variable	Autodimensionable.
Tipo de control de temperatura de zona	$^{\circ}C$	Temperatura media del aire	Temperatura media como parámetro de control.

4.2.3.2. ACS mediante bomba de calor aire-agua.

Como se ha comentado, el suministro de agua caliente sanitaria se realiza mediante un circuito independiente atendido por una bomba de calor aerotérmica dedicada exclusivamente a esta función. Esto permite seleccionar un modelo más adecuado para tal labor liberando a la bomba dedicada a la calefacción de trabajar en niveles de temperatura que afectan negativamente a su rendimiento. Por otra parte, a diferencia del circuito de calefacción, en el caso del ACS es necesario contar con tanques de acumulación. En la Figura 4.15 se aprecia en forma de diagrama los componentes definidos para este circuito de agua caliente destinada a ACS.

En la parte de suministro se encuentra la bomba de calor con su tanque de acumulación, la bomba del circuito de agua y un controlador de temperatura, que aunque es obligatorio definirlo no participa en el control del circuito. La señal que controla la temperatura del circuito es la que se define en el compresor de la bomba de calor, tal y como se describe en la Tabla 4.3 del subapartado anterior.

En la parte de demanda se encuentra el elemento que define la carga de este sistema, denominado “Grupo de Salida de Agua”. En este elemento es donde se define el horario de consumo descrito en el subapartado 4.2.2.2.

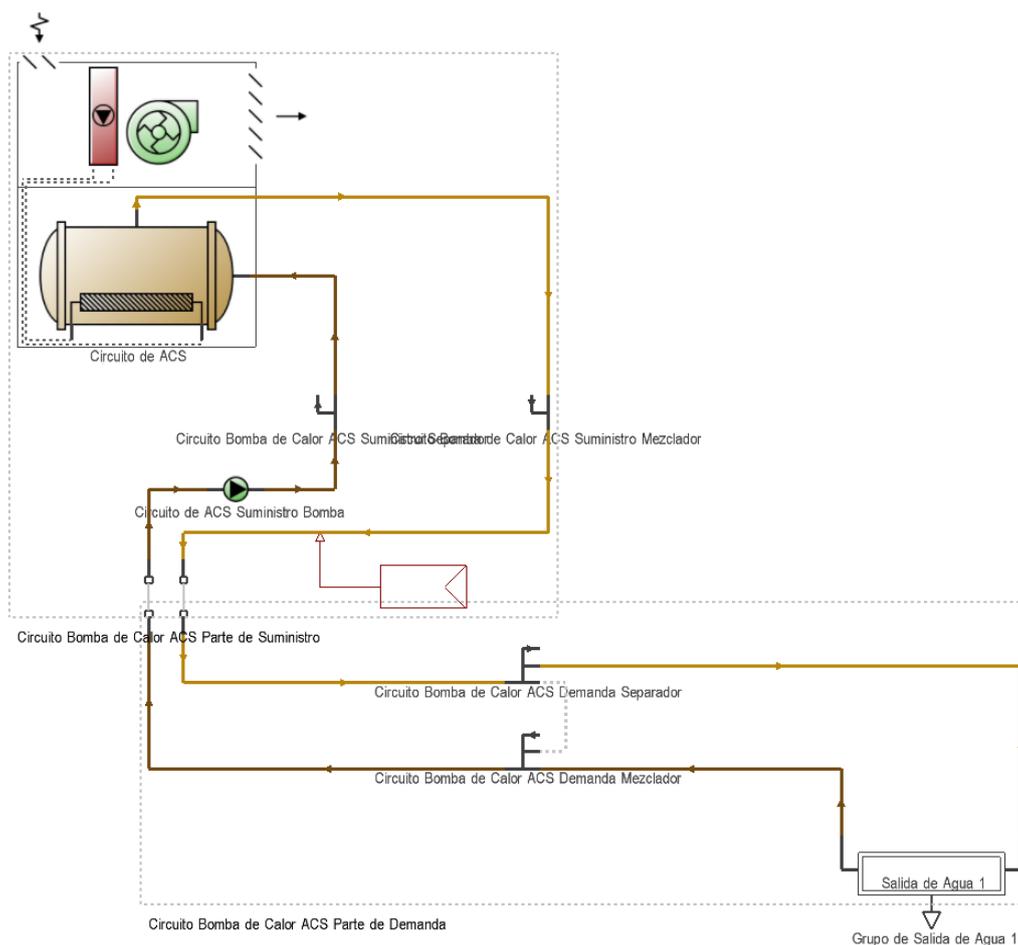


Figura 4.15 – Circuito de agua caliente para calefacción de zona..

4.2.3.2.1. Características de la bomba de calor para ACS.

La bomba de calor seleccionada para ACS corresponde al modelo AquaSnap 61 AF-045 de la marca Carrier, que emplea refrigerante R407C. Su capacidad calorífica nominal es de 43,8 kW y la variación de su rendimiento con la temperatura exterior, en este caso de bulbo húmedo, se ilustra en la Figura 4.16. Por su parte la variación de su capacidad calorífica (Q_h) es indicada en la Figura 4.17. Estas gráficas han sido extractadas a partir de los datos declarados por el fabricante en el correspondiente catálogo de la máquina, el cual puede consultarse en el apartado B.2.2. del Anexo B.

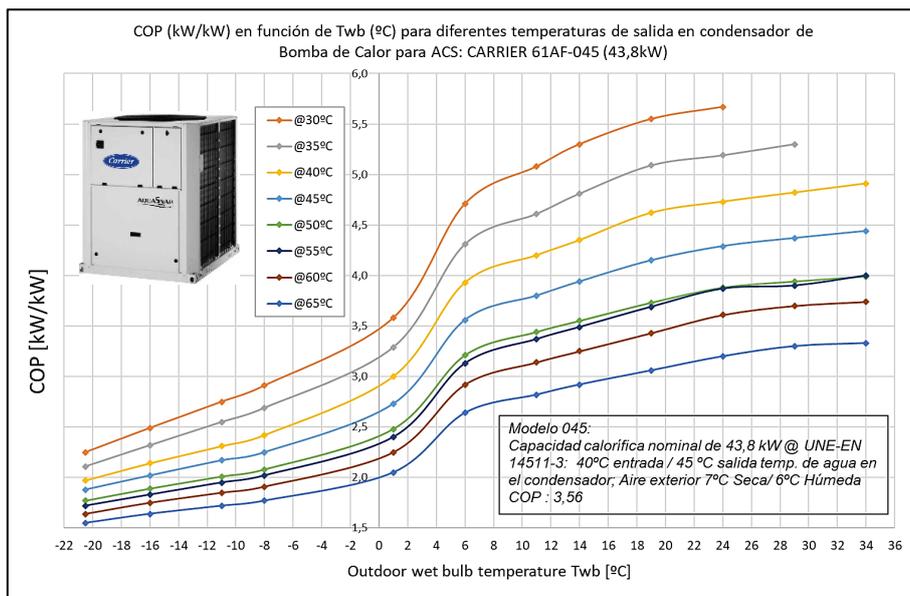


Figura 4.16 –Variación del COP para diferentes temperaturas de aplicación de la bomba de calor para ACS del modelo de edificio.

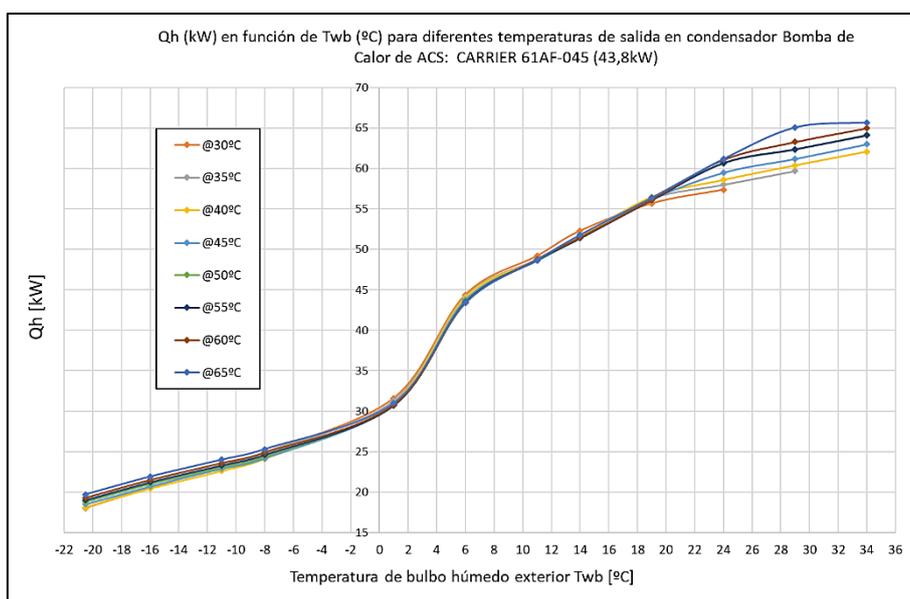


Figura 4.17 –Variación de la capacidad calorífica Qh para diferentes temperaturas de aplicación de la bomba de calor para ACS del modelo de edificio.

4.2.3.2.2. Definición de la Bomba Carrier 61 AF-045 en DesignBuilder.

En la Tabla 4.5 se listan las principales propiedades utilizadas para la definición de la bomba de calor para ACS en el modelo, mientras que en el apartado B.3.3 del Anexo B se exponen más detalles de este componente.

Tabla 4.5 – Parámetros más relevantes en la definición de la Bomba de Calor de Calefacción.

Parámetro	Magnitud	Valor	Descripción
Temperatura de salida del agua del condensador	$^{\circ}\text{C}$	60 Programada constante para todo el año	Es la temperatura objetivo del calentamiento de agua por parte de la bomba de calor. En el componente DesignBuilder es denominada “consigna de temperatura del compresor”
Aire de entrada	Propiedades psicrométricas del aire	Solo aire exterior	Indica que el evaporador está ubicado en el exterior y por tanto trabajará con las condiciones instantáneas del aire recogidas en el fichero meteorológico del sitio. Este es uno de los factores que cambia en el edificio con FVFF especialmente en el verano, tal y como se expone más adelante.
Tanque calentador del agua	m^3	2	
Capacidad de calefacción nominal	W	43800	Correspondiente al modelo 045
COP Nominal	kW/kW	3,56	Correspondiente al modelo 045
Temperatura nominal de bulbo seco. Aire que entra al evaporador	$^{\circ}\text{C}$	7	De acuerdo a las condiciones en que se han determinado las propiedades nominales de la bomba 61 AF-045: UNE-EN 14511-3.
Temperatura nominal de bulbo húmedo. Aire que entra al evaporador	$^{\circ}\text{C}$	6	De acuerdo a las condiciones en que se han determinado las propiedades nominales de la Bomba 61 AF-045: UNE-EN 14511-3.
Temperatura nominal del agua que entra al condensador.	$^{\circ}\text{C}$	40	De acuerdo a las condiciones en que se han determinado las propiedades nominales de la Bomba 61 AF-045: UNE-EN 14511-3.
Potencia de la bomba de agua del condensador.	W	150	
Fracción de calor de la bomba del condensador al agua	$[-]$	0,2	
Otras consideraciones	-	-	- Potencia de la bomba del condensador incluida en el COP nominal. - Potencia del ventilador del evaporador incluida en el COP nominal. - Calor de la bomba del condensador incluido en la capacidad nominal de calefacción y el COP nominal.

Las curvas de DesignBuilder para el rendimiento de esta bomba de calor para ACS tanto para la capacidad de calefacción como el COP se muestran en la Figura 4.18 y en la Figura 4.19. El proceso de generación de estas curvas es descrito en el apartado B.3.4 del Anexo B.

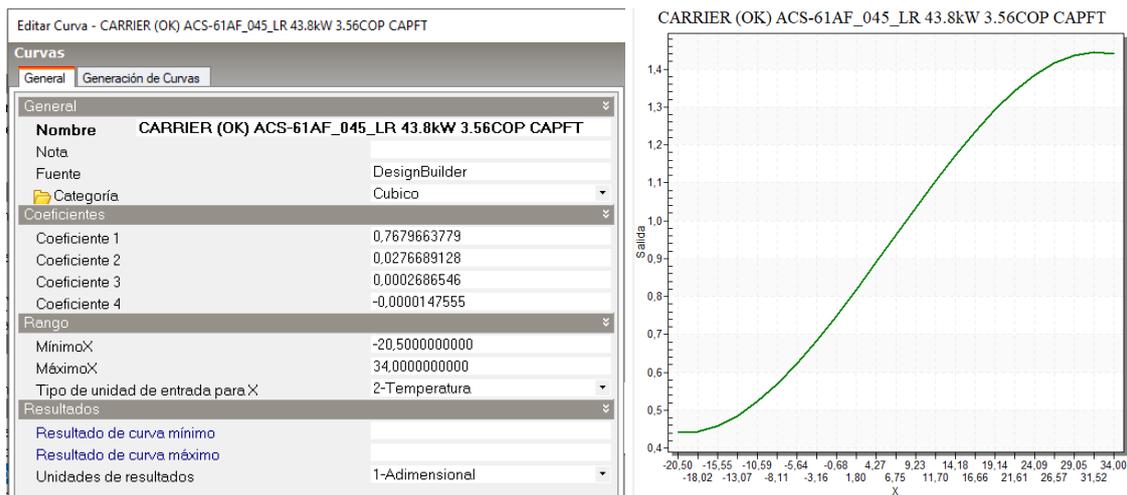


Figura 4.18 – Curva de capacidad de calefacción de la bomba Carrier 61 AF-045 en función de la temperatura de bulbo húmedo exterior en formato compatible con EnergyPlus

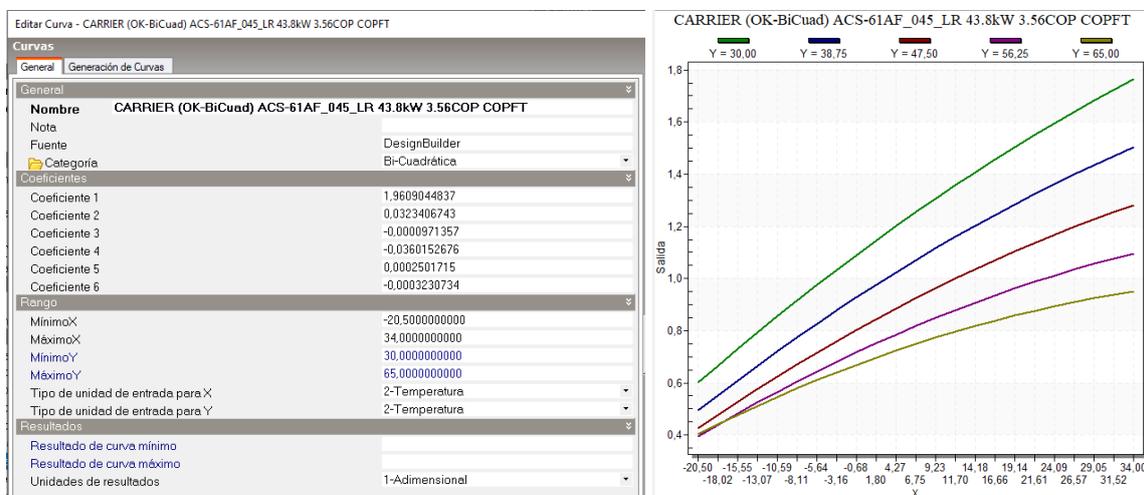


Figura 4.19 – Curva de COP de la bomba Carrier 61 AF-045 en función de la temperatura de bulbo húmedo exterior en formato compatible con EnergyPlus

4.2.3.2.3. Demanda de ACS mediante grupo de salida de agua.

Como se ha indicado, la demanda de ACS en el modelo de DesignBuilder se ha definido mediante el componente denominado “Grupo de salida de agua”. Este calcula un consumo de agua de acuerdo a la programación indicada para el caudal, con un consumo energético en función del salto térmico entre la temperatura de agua de red del sitio y la programación de temperatura destino definida.

En la Figura 4.20 se indican los parámetros definidos para el componente grupo de salida de agua. La programación de temperatura objetivo para este flujo de agua es la misma que se ha utilizado para la bomba de calor, es decir siempre 60 °C (ver apartado B.3.3, anexo B). Por su parte la programación del caudal está dada en función del consumo de ACS diario cuyo valor fue expuesto en la anterior Figura 4.6, con la programación ya indicada en la anterior Figura 4.7.



Figura 4.20 –Definición de la demanda de ACS mediante el componente “Grupo da Salida de Agua”.

Por su parte, la temperatura de agua de red está definida en el anejo G del DB-HE, en este caso para la ciudad de Madrid (ver apartado B.1.4 del anexo B). Esta se introduce en el modelo de DesignBuilder como una programación en los datos del sitio (Figura 4.21), mediante la ficha que se muestra en la Figura 4.22.

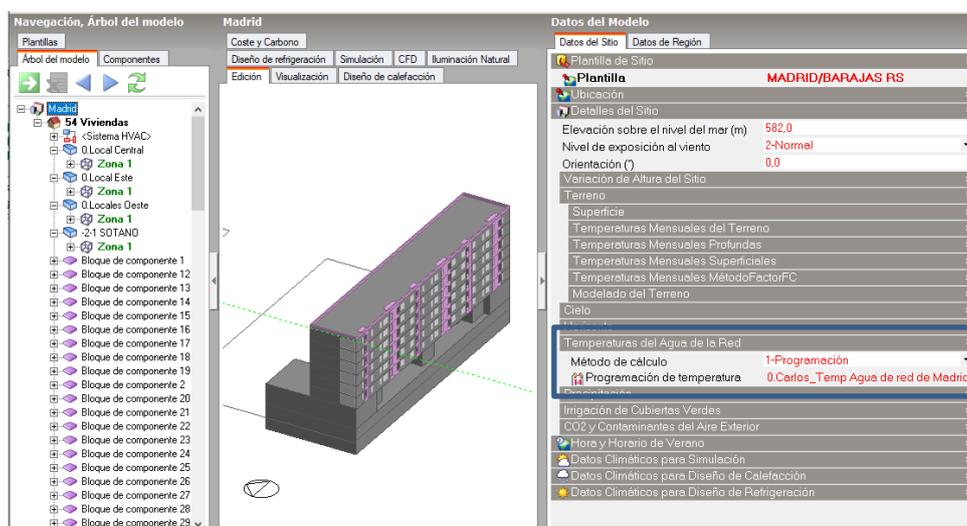


Figura 4.21 –Definición de la temperatura de agua de la red en los detalles del sitio del Modelo.

Nombre	0.Carlos_Temp Agua de red de Madrid						
Descripción							
Fuente	DesignBuilder						
Categoría	<General>						
Región	General						
Tipo de programación	1-Programación 7/12						
Días de diseño							
Método de definición del día de diseño	1-Usó final predeterminado						
Usó final predeterminado	1-General						
Perfiles							
Mes	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Ene	8	8	8	8	8	8	8
Feb	8	8	8	8	8	8	8
Mar	10	10	10	10	10	10	10
Abr	12	12	12	12	12	12	12
May	14	14	14	14	14	14	14
Jun	17	17	17	17	17	17	17
Jul	20	20	20	20	20	20	20
Ago	19	19	19	19	19	19	19
Sep	17	17	17	17	17	17	17
Oct	13	13	13	13	13	13	13
Nov	10	10	10	10	10	10	10
Dic	8	8	8	8	8	8	8

Figura 4.22 –Programación de la temperatura de agua de red en el modelo para la ciudad de Madrid.

4.2.3.3. Sistema de ventilación mecánica de doble flujo con recuperación de calor.

La ventilación mecánica de doble flujo con recuperación de calor (VMDF-RC) preserva la calidad de aire interior del edificio con un gasto energético bajo. Esta cualidad hace que sea un sistema comúnmente empleado para asegurar la calidad de aire interior en edificios de consumo casi nulo. En el presente análisis se ha adoptado el sistema VMDF-RC estándar incorporado en DesignBuilder (Figura 4.27). Este tiene una eficiencia de recuperación del 70%, con un caudal definido por persona, de tal forma que variará a lo largo del día y del año entero en función de la densidad de ocupación.

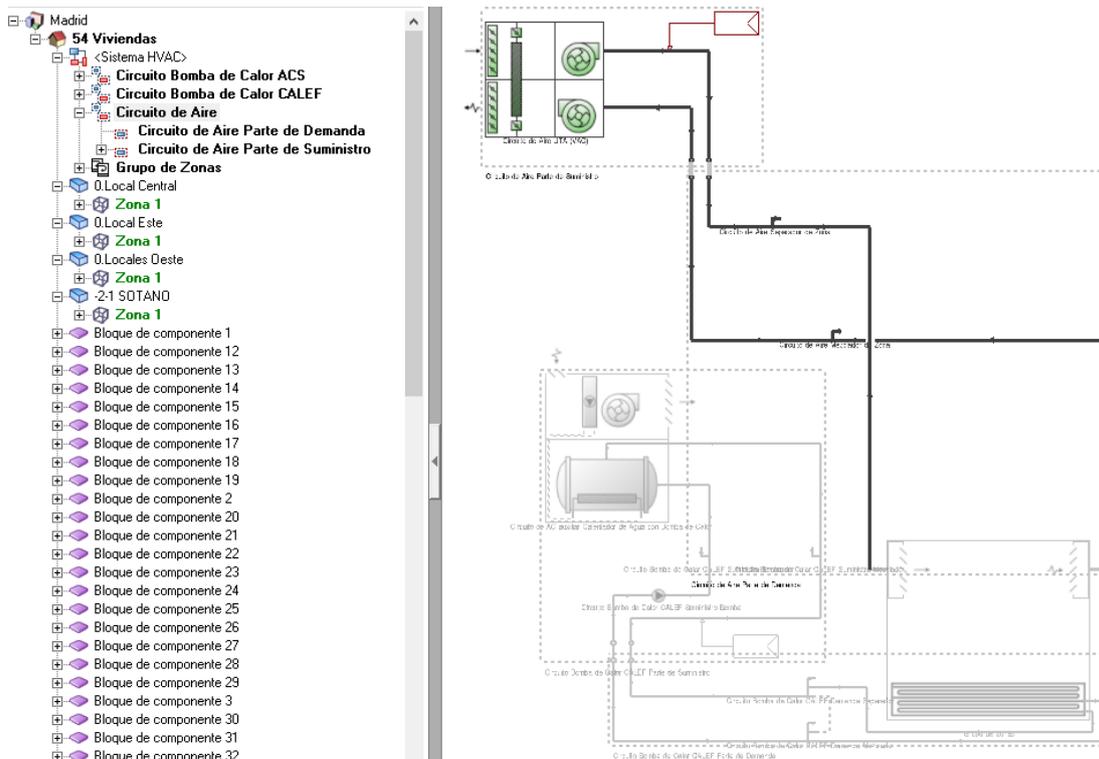
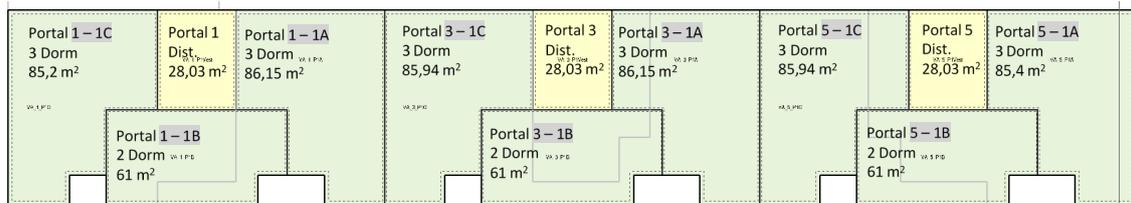


Figura 4.23 –Esquema del circuito de aire de ventilación con recuperación de calor.

La demanda de ventilación se orienta por lo establecido en la “Tabla 2.1 Caudales mínimos para ventilación de caudal constante en locales habitables” del Documento Básico de Salubridad HS del CTE, en su sección “HS 3 Calidad del aire interior” (véase apartado B.1.5 del Anexo B). El parámetro relevante que ha definido el caudal mínimo para todas las viviendas ha sido el mínimo requerido para los locales húmedos. Con este valor y la densidad de ocupación definida para el edificio, se obtiene el caudal de ventilación por persona indicado en la Figura 4.24.

Es recomendable dimensionar la capacidad de flujo de aire del recuperador de calor mediante la opción “según requerimiento de ventilación” en el tipo de carga para dimensionado, con un caudal nominal de aire exterior autodimensionable (ver Figura 4.25). Con esto se consigue que el recuperador de calor ajuste su caudal en función de la ocupación, pues se determina a partir del caudal de ventilación requerido por persona (Figura 4.24). De hecho, este parámetro se define en las propiedades de la zona a acondicionar, tal y como se muestra en la Figura 4.26.



Portal 1				Portal 3				Portal 5						
Mano	Dormit	Pers.	Caudal según nº Dorm. [l/s]	Caudal según locales hum. [l/s]	Mano	Dormit	Pers.	Caudal según nº Dorm. [l/s]	Caudal según locales hum. [l/s]	Mano	Dormit	Pers.	Caudal según nº Dorm. [l/s]	Caudal según locales hum. [l/s]
A	3	4	26	33	A	3	4	26	33	A	3	4	26	33
B	2	3	20	24	B	2	3	20	24	B	2	3	20	24
C	3	4	26	33	C	3	4	26	33	C	3	4	26	33
Total Portal		11	72	90			11	72	90			11	72	90

Caudal de ventilación total demandado por planta [l/s]	270
Caudal de ventilación total demandado por el edificio [l/s]	1620
Total de ocupación edificio según dormitorios [personas]	198
Total de ocupación edificio según densidad de ocupación de 0,0,5 personas/m ² [personas]	209
Caudal de ventilación por persona según densidad de ocupación [(litros/segundo)/persona]	7,75
Caudal de ventilación por persona [(m ³ /s)/persona]	0,00775

Figura 4.24 – Determinación del caudal de ventilación por persona a partir de los requerimientos de locales habitables.



Figura 4.25 – Definición del tipo de carga que dimensiona el circuito de aire.

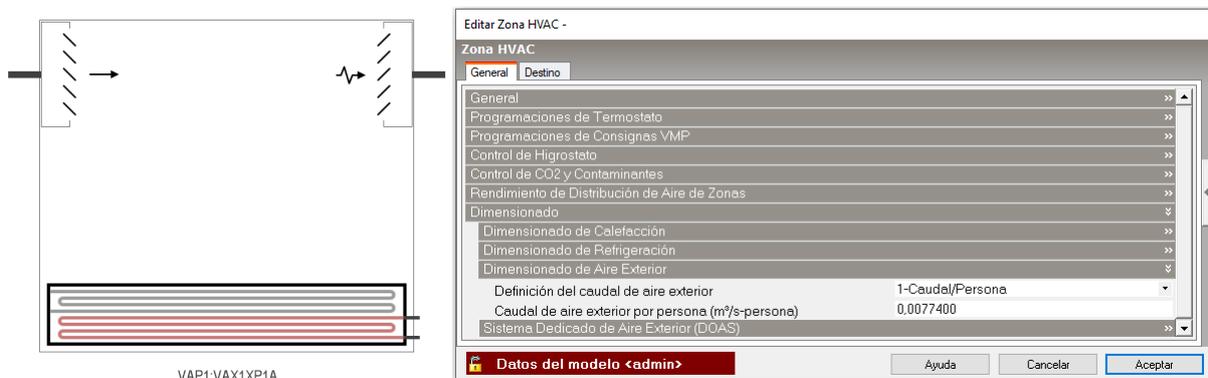


Figura 4.26 – Definición del caudal de ventilación por persona en las propiedades de Zona HVAC.

4.2.3.4. Temperatura de consigna interior – edificio de referencia

El CTE en la “tabla a” de su “Anejo D” de condiciones operacionales y perfiles de uso establece que la temperatura de consigna para espacios acondicionados en uso residencial privado tiene dos periodos: uno de menor temperatura a 17 °C entre las 23:00 y las 07:00 h, y otro de mayor temperatura a 20 °C entre las 07:00 y las 23:00 h. Debido a que el edificio analizado se calefacta por suelo radiante y que tarda un tiempo en conseguir la consigna tras dejar bajar la temperatura interior por las noches, se define una consigna ligeramente mayor diurna de 21 °C (Figura 4.27). El sistema de calefacción del presente caso de estudio funciona con baja potencia, por lo que se apoya en la respuesta inercial del edificio. En el apartado de resultados se discute lo que sucede en un edificio como este cuando se aplica una programación como la establecida por el CTE, más orientada a sistemas de calefacción con alta potencia.

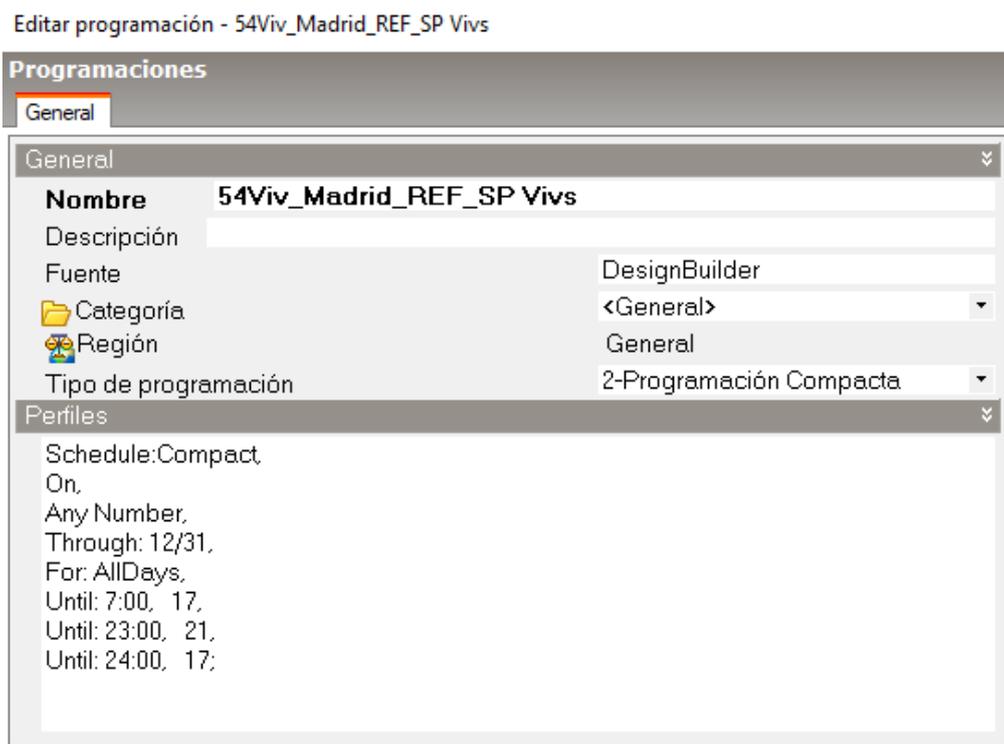


Figura 4.27 –Programación de la temperatura de consigna interior de calefacción edificio de referencia.

4.3. Descripción del modelo de edificio con FVFF

A continuación se describen los aspectos que diferencian el modelo de edificio con FVFF respecto del edificio de referencia:

- La solución de fachada sur es mixta, teniendo tramos de fachada con la solución del edificio de referencia, y tramos con la composición de FVFF.
- A las instalaciones se añade la generación eléctrica de los vidrios fotovoltaicos.

- El intercambio de calor del evaporador de la bomba de calor aerotérmica de calefacción se realiza con aire extraído de la FVFF en lugar de aire exterior.
- El intercambio de calor del evaporador de la bomba de calor aerotérmica de ACS durante el verano se realiza con aire extraído de la FVFF en lugar de aire exterior.
- Para el caso en que se quiere simular al edificio como un acumulador térmico, la temperatura de consigna en el interior del edificio se convierte en un parámetro dinámico, dependiente de las condiciones de ganancia térmica en la FVFF.

4.3.1. Incorporación de elementos de FVFF en fachada sur

La fachada sur del edificio de referencia se convierte en una fachada FVFF añadiendo como capas exteriores la cámara de aire y la hoja de vidrios fotovoltaicos. La definición geométrica de esta hoja exterior de vidrios fotovoltaicos solo es posible en los tramos opacos de la fachada sur.

En la Figura 4.28 se aprecia el aspecto del modelo de edificio incorporando tramos de fachada FVFF en la cara sur, con una altura total igual a la del edificio de 19,4 metros.



Figura 4.28 –Aspecto del modelo de edificio incorporando tramos de fachada FVFF en la cara sur

Hay siete tramos que poseen el mismo ancho que la muestra ensayada en la fase experimental, es decir un ancho total de FVFF de 2,70 metros, formada por dos columnas de módulos de vidrios fotovoltaicos de 1,24 x 0,64 metros (Figura 4.29 (a)). El ancho del resto de tramos de FVFF se definen aprovechando el hecho de que los vidrios fotovoltaicos pueden fabricarse a medida. A estos tramos se les asignaron las dimensiones que se indican en los esquemas (b), (c) y (d) de la Figura 4.29. Se evitó obtener módulos más anchos que el módulo original de 1,24 m.

Los módulos indicados en la Figura 4.29 tienen una superficie neta de generación algo menor, debido a que las células de silicio dejan un espacio libre de 2 cm por todo el perímetro

del rectángulo que forma el elemento de vidrio. Teniendo esto en cuenta, la hoja de vidrios fotovoltaicos opacos se representa de forma simplificada en el modelo de simulación, como carriles continuos opacos sobre los que se apoya una franja fotovoltaica. El área de estas franjas es equivalente a la serie de módulos que representa. Dichas equivalencias también se indican en la Figura 4.29. Haciendo esta simplificación hay una leve diferencia por el ángulo de incidencia para los módulos ubicados en los extremos superior e inferior, que no resulta relevante. De esta forma se reduce significativamente la cantidad de elementos que gestionar y calcular en el modelo, de 841 a 29 módulos.

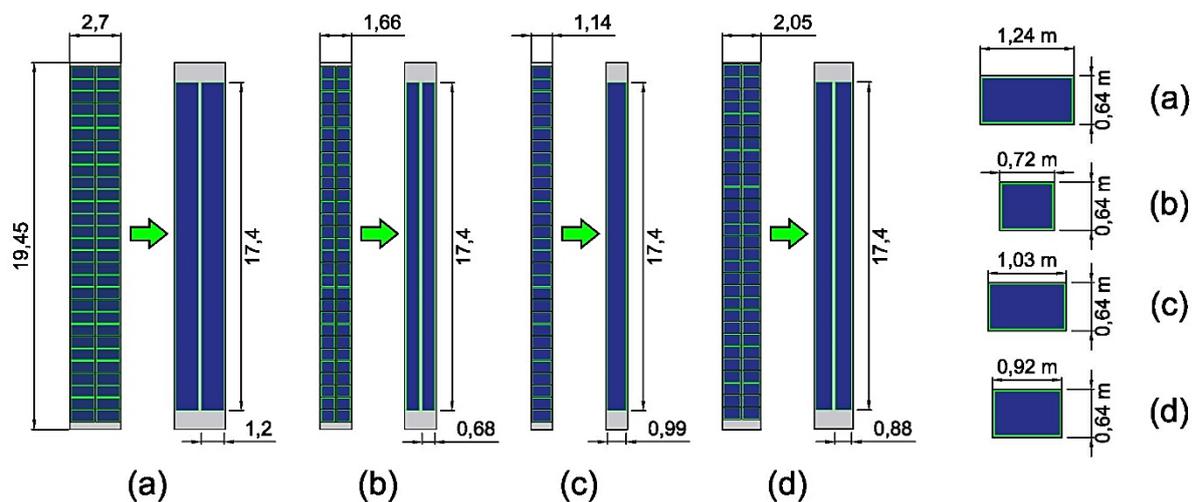


Figura 4.29 – Geometrías de los carriles de módulos fotovoltaicos definidos para la FVFF y adaptación a franjas equivalentes

4.3.2. Definición de la generación fotovoltaica de la FVFF

La generación eléctrica en el sitio se define a nivel de “datos del modelo” (Figura 4.30), por medio de centros de carga eléctrica que pueden contener un máximo de 30 generadores. Los generadores primero se definen geoméricamente como colectores solares (Figura 4.31) para luego ser dados de alta en el centro de carga como elementos fotovoltaicos.

Tal y como se indicó en el Capítulo 2 de caracterización experimental. La eficiencia media de la generación eléctrica diaria de estos vidrios es del 5%.



Figura 4.30 –Definición de generación eléctrica en sitio a nivel de datos del modelo

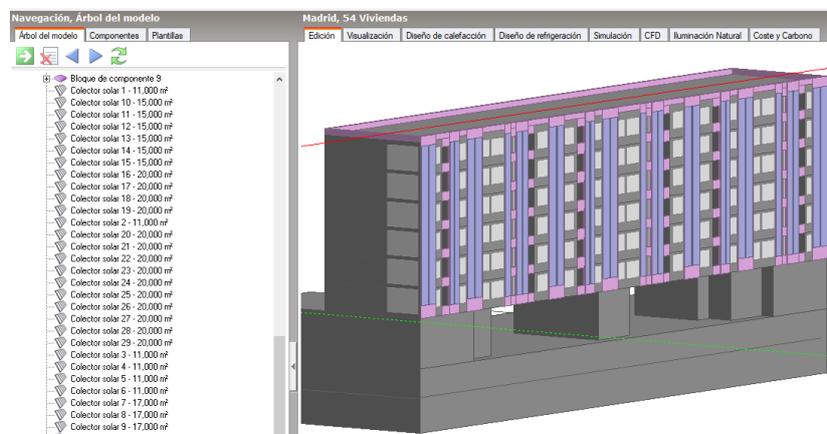


Figura 4.31 –Definición de los 29 elementos fotovoltaicos en el árbol del modelo FVFF

4.3.3. Intercambio del aire extraído de la FVFF y los evaporadores de las bombas de calor

Seguidamente se explica la forma en que se ha vinculado la masa de aire precalentado en la FVFF con los evaporadores de las bombas de calor mediante los recursos de definición del modelo en DesignBuilder.

Las bombas de calor se definen tal y como se ha descrito en los subapartados 4.2.3.1 y 4.2.3.2, teniendo como única diferencia que el aire de entrada al evaporador no corresponde a las condiciones de aire exterior, sino a las condiciones indicadas en un fichero horario para todo el año (Figura 4.32).

Las condiciones de humedad y temperatura del aire en estos ficheros horarios corresponden a la temperatura de cámara de aire predicha por el modelo numérico de la FVFF para la localidad del caso de estudio.

Para que el motor de cálculo de DesignBuilder haga la vinculación descrita, es necesario compilar “scripts” de programación. En el apartado B.3.5 del Anexo B se describe en detalle dicha programación.

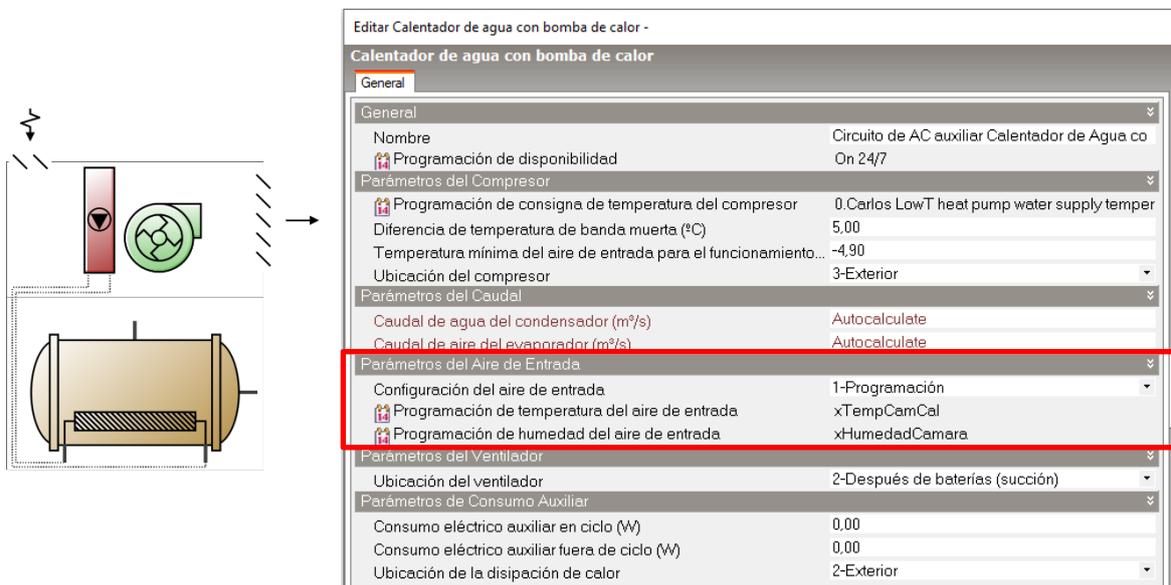


Figura 4.32 –Definición de temperatura de aire de entrada a la bomba de calor en el modelo con FVFF

4.3.4. Temperatura de consigna adaptativa definida para el modelo de edificio con FVFF

Tal y como se ha indicado en la descripción de la fase experimental, una de las principales características de la FVFF es su funcionamiento condicionado a los niveles de temperatura del ambiente y de la hoja exterior. Según los valores instantáneos de estas temperaturas, el caudal extraído de la cámara se posiciona en su valor más alto cuando la fachada se encuentra en unas condiciones que se han denominado “modo ganancia térmica”. Por definición, dichas condiciones ocurren cuando la cara externa de la hoja exterior tiene una temperatura superficial cinco grados centígrados más caliente que la temperatura ambiente. Esta diferencia representa de forma implícita que hay una radiación vertical incidente lo suficientemente significativa para que ocurra un flujo de calor neto desde la hoja exterior hacia el flujo de aire de la cámara ventilada.

Cuando la FVFF se encuentra operando en “modo ganancia térmica”, el flujo de aire caliente mejora el rendimiento de la Bomba de Calor de calefacción. Por tanto, los instantes de ganancia térmica, a su vez son los instantes de mayor eficiencia del sistema de calefacción.

Sin embargo, como suele suceder con las aplicaciones de energías renovables basadas en aprovechamiento solar, los picos de generación tienen un desfase importante con los picos de demanda.

La respuesta a esta discrepancia entre generación y demanda es la acumulación. Para el caso de la presente investigación, la acumulación requerida debe ser de tipo térmico. La técnica más evidente y que se ve con frecuencia en la literatura, sería la de emplear tanques de acumulación. No obstante, se ha querido explorar la opción de usar la propia estructura del edificio como medio de acumulación energética, aprovechando que el sistema de calefacción es un suelo radiante y la alta inercia térmica de dicha estructura, en especial de los forjados.

El mecanismo que consigue la acumulación térmica en la estructura, es el aporte de calor extra al ambiente calefactado a través de la manipulación de la temperatura de consigna.

Dicha manipulación de la temperatura de consigna no puede ser arbitraria ni aleatoria, pues tiene un límite máximo según confort y debe ocurrir en instantes de alta eficiencia del sistema, es decir, en los que la fachada se encuentra operando en modo ganancia térmica.

Es por ello que esta forma de definir la temperatura de consigna interior se ha venido a denominar como “temperatura de consigna adaptativa”, porque se adapta a las condiciones de operación del sistema de calefacción.

Los principios de definición de la Temperatura de Consigna Adaptativa han sido los siguientes:

- El horario base de la consigna de temperatura interior es el mismo que en el edificio de referencia: 21 °C de 07:00 a 23: 00 horas; 17 °C de 23:00 a 07:00 horas.
- Si la fachada se encuentra en modo ganancia, es decir con alto caudal de extracción, aumenta la consigna de temperatura interior de 21 °C a 27 °C durante esa hora.
- Si a las 17 horas han transcurrido tres horas continuas con la temperatura de consigna aumentada a 27 °C, fija la consigna interior en 17 °C, adelantando así la consigna nocturna.
- A partir del 15 de marzo hasta junio y en octubre, se aplican los tres criterios anteriores, pero usando un valor de 24 °C en lugar de 27 °C

Estos últimos dos parámetros de control, por una parte, impiden que la temperatura interior alcance valores de discomfort extremos y por otra contribuye a reducir el consumo de la bomba de calor eliminando horas de consigna diurna de 21 °C.

4.4. Escenarios de Simulación

Los dos modelos: el de edificio de referencia y el de edificio con fachada FVFF, se han simulado para un año tipo entero en la ciudad de Madrid. Como se ha indicado, este año tipo es definido por la propia herramienta de simulación.

Los escenarios de simulación para el caso de estudio del análisis realizado en el presente capítulo han sido:

- Edificio de referencia, acondicionado térmicamente solo en periodo de calefacción, siguiendo una temperatura de consigna interior tipo CTE.
- Edificio con FVFF, acondicionado térmicamente solo en periodo de calefacción, siguiendo una temperatura de consigna interior tipo CTE.
- Edificio con FVFF, acondicionado térmicamente solo en periodo de calefacción, siguiendo una temperatura de consigna interior “adaptativa”, con los evaporadores de las Bombas de Calor conectados al flujo de aire extraído de la cámara de la FVFF.

4.5. Resultados y Discusión

4.5.1. Efecto de la consigna tipo CTE en el edificio de Referencia

En la Figura 4.33 se aprecia la evolución en invierno de la temperatura media diaria del aire interior de las 54 viviendas para el modelo del edificio de referencia. Se aprecia que la gran mayoría de las viviendas consiguen oscilar en torno a la consigna de 21 °C, aunque algunas acusan su ubicación en plantas más expuestas al intercambio con el exterior.

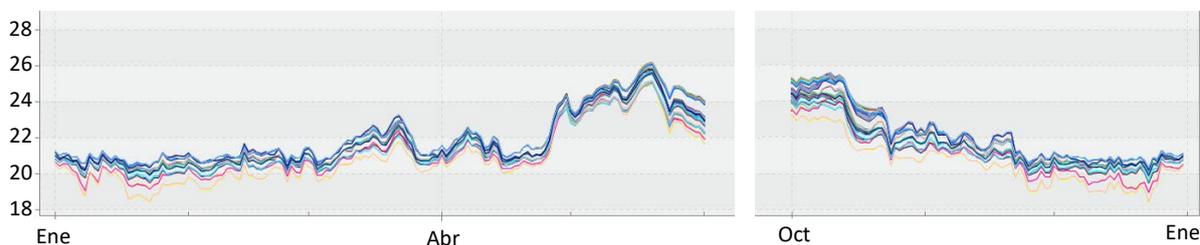


Figura 4.33 –Temperatura media diaria interior en invierno de las 45 viviendas, edificio de referencia.

Para observar en más detalle el efecto de la definición de consigna de temperatura en el edificio de referencia, en la Figura 4.34. se muestra un día de enero para todas las viviendas ubicadas en el extremo este del edificio. Estas viviendas son las más demandantes de energía por orientación y superficie de fachada. Como cabía esperar, se comprueba que la vivienda de la planta primera sobre locales no habitables y la superior bajo cubierta son más desfavorables que las intermedias. Igualmente, se aprecia el efecto inercial del suelo radiante, que consigue que el descenso de la temperatura durante la noche para las cuatro viviendas intermedias sea inferior a 1,5 °C. Como contrapartida, hace que durante el día sean necesarias aproximadamente cinco horas para alcanzar la consigna en las viviendas intermedias.

Cabe resaltar que el comportamiento observado para la vivienda bajo cubierta y con fachada en orientación este, corresponde al de la vivienda más desfavorable de todo el edificio. Esta vivienda muestra caídas de temperatura interior del orden de dos grados centígrados tras el paro de la calefacción por la consigna nocturna.

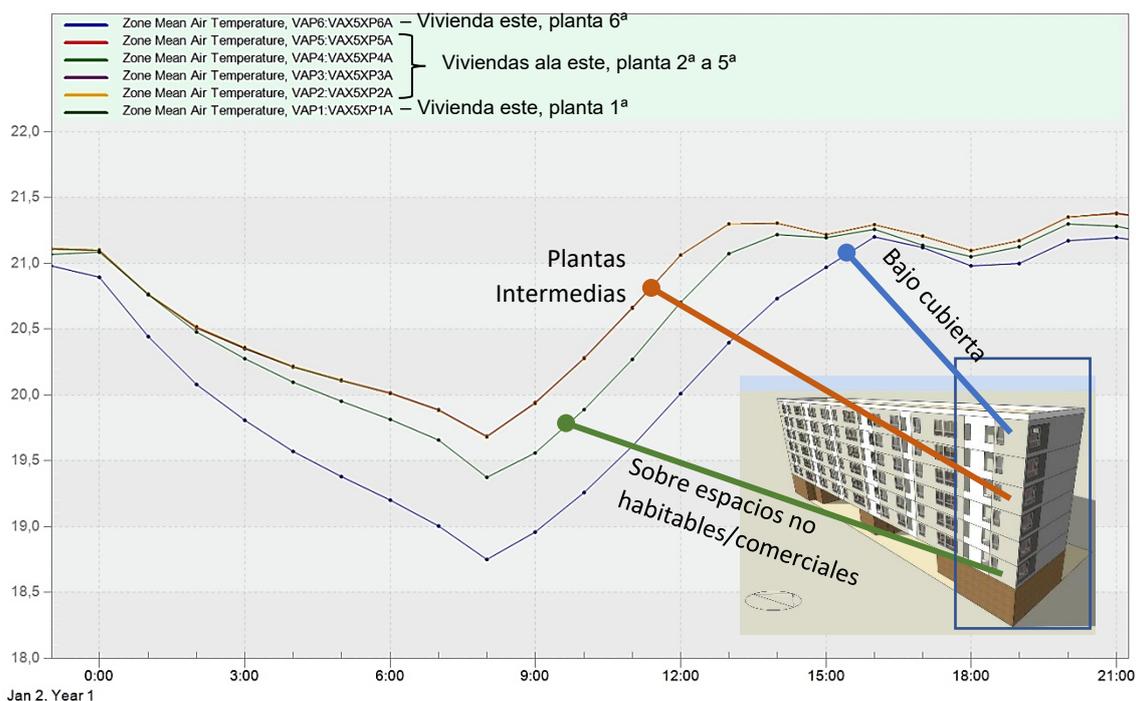


Figura 4.34 – Valor horario de temperatura interior en viviendas del extremo este – caso referencia.

Queda claro que la consigna sugerida por el CTE está pensada para sistemas menos inerciales, y que para el modelo del edificio de referencia analizado se requeriría un control más específico, incluso definido por plantas y en función de las condiciones exteriores. Sin embargo, se mantiene la consigna del CTE por tratarse de la referencia oficial y porque la mayor parte del tiempo diurno la vivienda se mantiene cerca del valor de confort térmico de 20°C.

4.5.2. Determinación de la ganancia térmica en cámara de FVFF

Una vez simulado el modelo de edificio de referencia, datos de salida de dicha simulación constituyen entradas para el modelo numérico de la fachada FVFF que se ha descrito en el capítulo tres.

Este modelo determina la temperatura del aire a su paso por la cámara de la FVFF para el año entero, empleando como datos de entrada valores diez minutos de temperatura media interior del edificio de referencia, la radiación solar incidente vertical en la fachada sur, y la temperatura exterior del sitio.

En la Figura 4.35 se muestra el aumento instantáneo en la temperatura de cámara determinado para la totalidad del año. El aumento en invierno es aprovechado como aire precalentado para los condensadores de la bomba de calor de calefacción y de ACS, mientras que el de verano solo en la de ACS

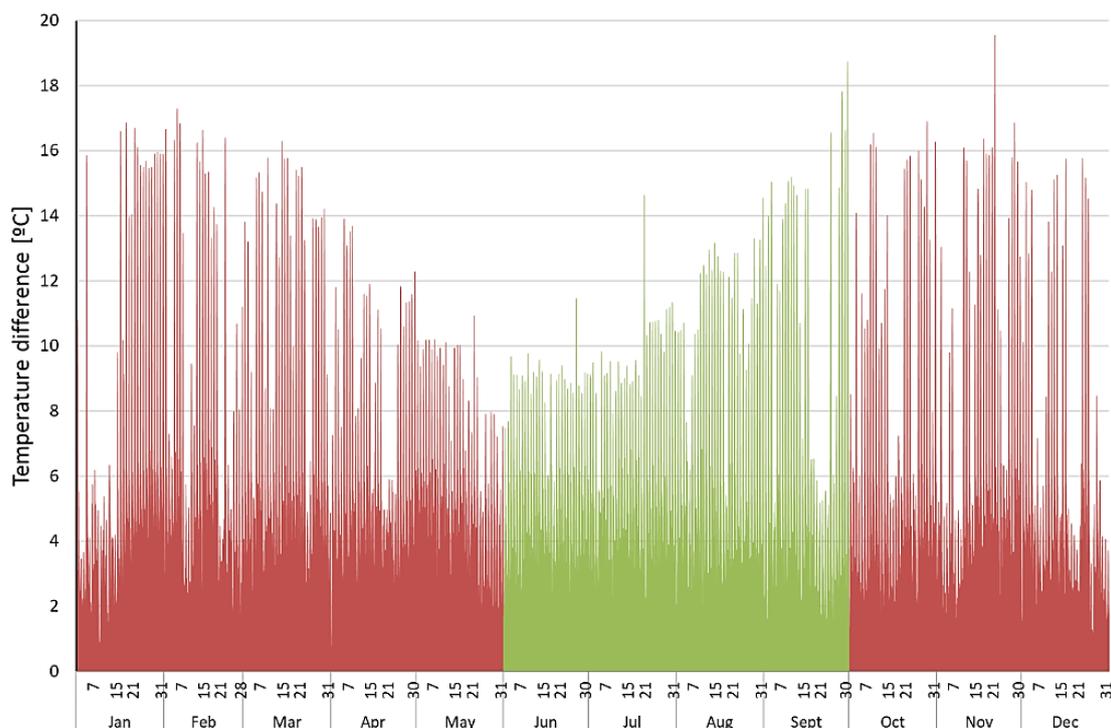


Figura 4.35 –Valor instantáneo para la diferencia de temperatura del aire extraído de la FVFF con respecto al aire exterior, obtenido por el modelo numérico.

4.5.3. Efecto de la consigna adaptativa en el edificio con FVFF

La respuesta del edificio a nivel de condiciones de temperatura interior con la consigna CTE, ha sido muy similar tanto en el caso de referencia como en el de fachada con FVFF.

A continuación se analiza que sucede con estas condiciones en el caso de edificio con fachada FVFF y la consigna de temperatura “adaptativa” descrita en el apartado 4.3.4. La Figura 4.36 muestra la evolución de la temperatura media diaria del aire interior para las 54 viviendas con dicha consigna.

Se observa una mayor amplitud en la diferencia de temperaturas entre viviendas, y aunque las viviendas más expuestas de la planta bajo cubierta reducen su valor medio en torno a un grado centígrado, el resto de viviendas aumentan su valor medio en el sentido opuesto.

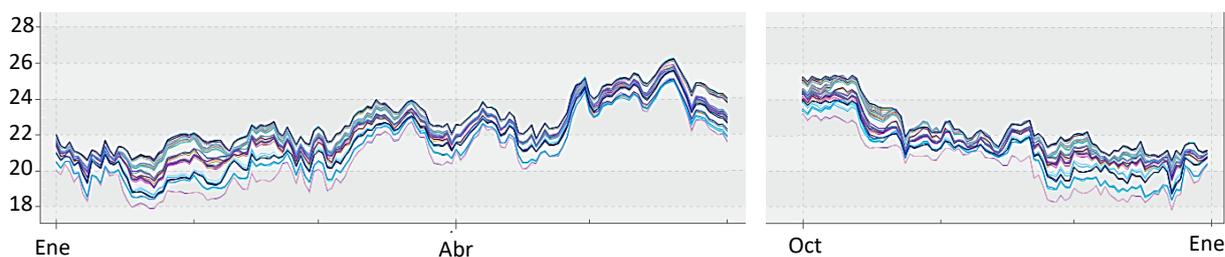


Figura 4.36 –Temperatura media diaria interior en invierno de las 45 viviendas, edificio con FVFF.

La Figura 4.37 hace una comparativa estadística de todos los valores horarios de la temperatura interior, para la totalidad de los espacios acondicionados durante el año de simulación. Se comprueba que los niveles de temperatura media en los meses de invierno son comparables, algo mayores en marzo y en abril y con diferencias inferiores a 0,5 °C en mayo, octubre, noviembre y diciembre. Se admite entonces que el modelo de edificio con FVFF produce una climatización de invierno equiparable al de referencia.

En los tres casos simulados las condiciones interiores son equiparables y por tanto las diferencias que se obtengan a nivel de consumo energético se considerarán diferencias netas.

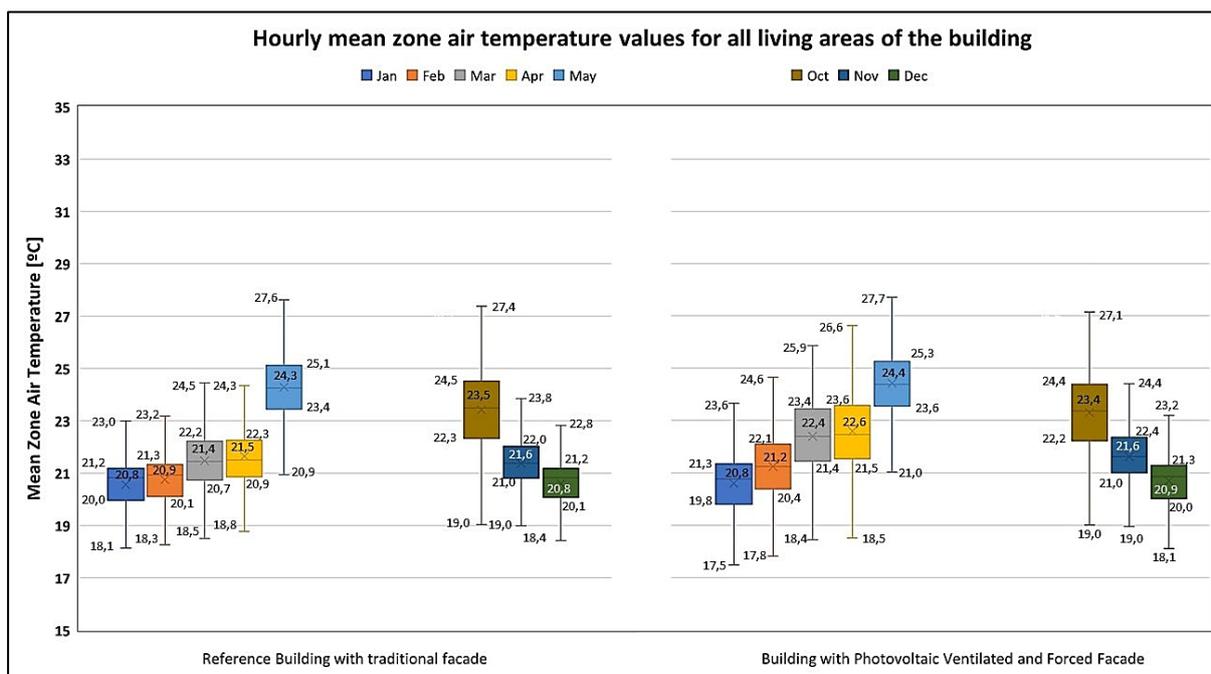


Figura 4.37 – Comparativa de los valores horarios en invierno de las temperaturas interiores de aire para los dos casos.

4.5.4. Mejora en la eficiencia del sistema y reducción del consumo energético

El componente calculador de bomba de calor de EnergyPlus® permite conocer los valores instantáneos de consumo eléctrico y de calor transferido en el condensador, y por tanto es posible determinar el valor instantáneo de COP para las dos bombas.

El uso de aire precalentado en fachada implica lógicamente un aumento en el COP instantáneo de las bombas de calor de calefacción y ACS (Figura 4.38), y uno de los principales resultados de la simulación energética es la cuantificación del beneficio obtenido por esta mejora en la eficiencia del sistema.

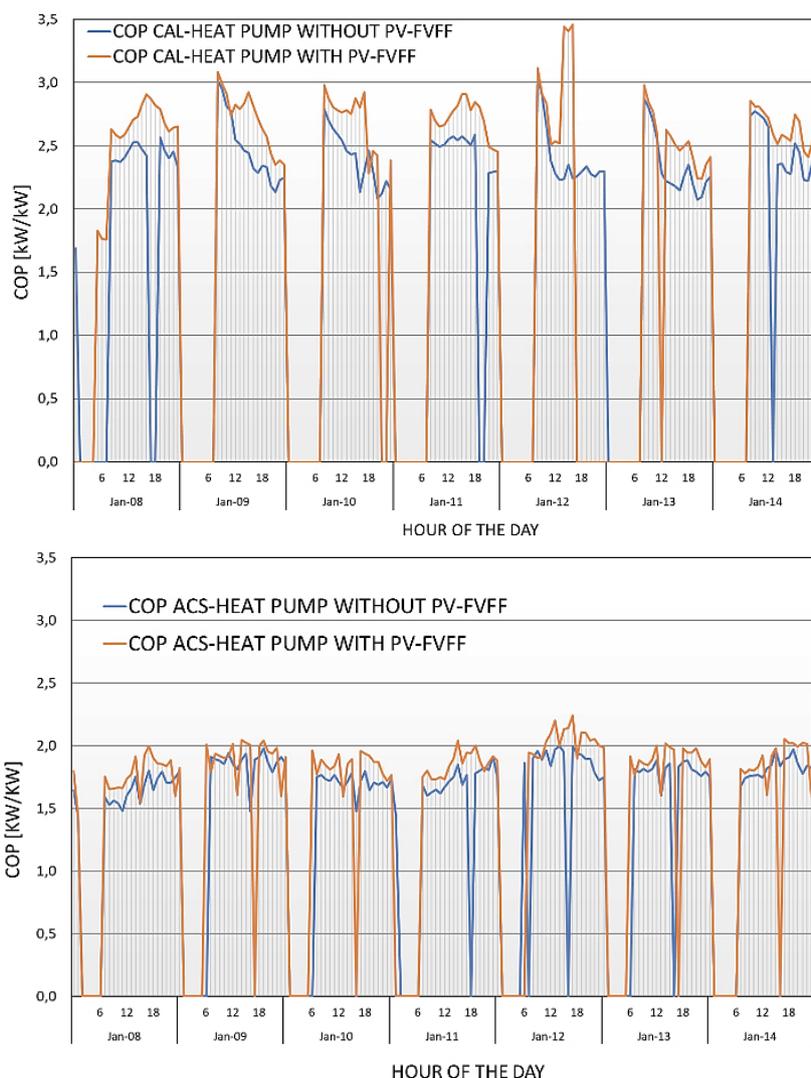


Figura 4.38 –Variación del COP para las Bombas de Calor de Calefacción y de ACS – 2ª semana de enero. Casos referencial vs FVFF con temperatura adaptativa.

A partir de la simulación del caso del edificio con módulos FVFF integrados, se ha determinado el cambio en los diferentes indicadores energéticos del edificio, dando lugar a los porcentajes de mejora en el COP estacional y a la reducción de consumo energético total que se indican en la Tabla 4.6. Como se puede apreciar, se indica la reducción en el consumo eléctrico tanto de la bomba de calor de calefacción como de la bomba de calor para ACS debido a la mejora en su rendimiento por el apoyo de la FVFF. Asimismo, se determina la generación eléctrica de los módulos fotovoltaicos.

Se ha comprobado que para todo instante en que hay generación fotovoltaica, hay un consumo eléctrico de las bombas de calor igual o superior, tal y como se aprecia en la Figura 4.39. Por lo tanto, la totalidad de la generación fotovoltaica puede contabilizarse como una reducción en el consumo eléctrico de la instalación.

Las curvas de COP de las bombas de calor incluyen el consumo de sus ventiladores, los cuales desplazan un caudal equivalente al extraído desde la fachada. El pequeño consumo extra por las pérdidas de carga, así como el de la fachada en modo de bajo caudal no ha sido

contabilizado; sin embargo, esta omisión es compensada por el carácter conservativo que ha tenido el presente análisis en todas sus etapas.

Esta Figura 4.39 también permite comprobar que el funcionamiento de las bombas de calor responde a los indicadores de control de funcionamiento horario. En el caso de la bomba de calor destinada a ACS reproduce cada día la curva de demanda de ACS establecida según ocupación. En el caso de la bomba de calefacción se observa el corte de funcionamiento siguiendo la consigna baja nocturna y el arranque o aumento de potencia matutino para conseguir la consigna alta diurna en torno a las siete de la mañana. Tal y como lo indica la curva de generación fotovoltaica, se trata de una semana de días soleados, lo que implica que la temperatura de consigna interior adaptativa ha podido cortar el funcionamiento de la Bomba de Calor de calefacción a las cinco de la tarde en lugar de las once de la noche, gracias al aporte diurno de más de tres horas seguidas por parte de la FVFF.

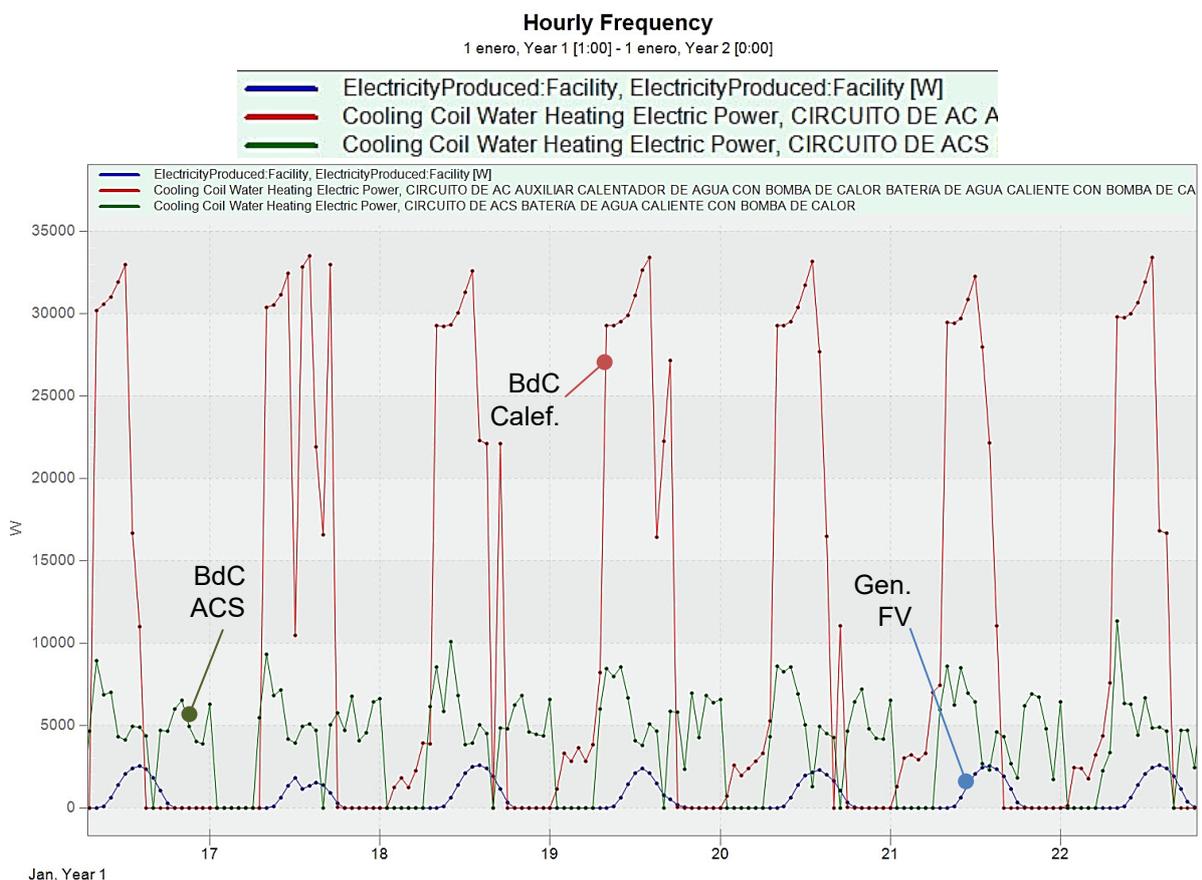


Figura 4.39 –Consumo eléctrico de las bombas de calor de calefacción y de ACS y electricidad generada por la hoja exterior de vidrios fotovoltaicos – 2ª semana de enero para el caso FVFF con temperatura adaptativa

Esta Tabla 4.6 resume todo el trabajo realizado hasta este punto en esta Tesis Doctoral, pues demuestra cuantitativamente la viabilidad de la hipótesis planteada desde un inicio: “una fachada ventilada forzada fotovoltaica FVFF puede usarse como foco de calor para mejorar la eficiencia del sistema edificio cuando este es calefactado mediante bomba de calor”. Se comprueba que es así, y que para el caso de estudio con una estrategia de consigna de temperatura interior adaptativa, ha sido una mejora de reducción del consumo eléctrico de la bomba de calor de calefacción de una quinta parte.

Tabla 4.6 – Principales indicadores de la mejora en la eficiencia energética del sistema y de su reducción asociada en el consumo energético

Parámetro	Equipo/Circuito	Edificio de referencia consigna CTE	Casos de simulación			
			Edificio con FVFF			
			FVFF_CTE		FVFF_Tadaptativa	
			Valor	% DIF	Valor	% DIF
SCOP [kW/kW]	Bomba de calor calefacción	2,3	2,6	+13,0%	2,7	+17,4%
	Bomba de calor ACS.	2,0	2,1	+5,0 %	2,1	+5,0 %
Consumo eléctrico [kWh/año]	Bomba de calor calefacción.	37.500,20	36.330,31	-3,1%	30.022,80	-19,9%
	Bomba de calor ACS.	32.893,32	31.397,33	-4,5%	31.397,33	-4,5%
Generación eléctrica FVFF [kWh/año]	–	–	5.580,19	–	5.580,19	–
TOTAL		70.393,52	62.147,45	-11,7%	55.839,94	-20,7%

4.5.5. Discusión

Los resultados del análisis a escala de edificio revelan el impacto que tiene la estrategia de control basada en una consigna de temperatura adaptativa “*Tadaptativa*”, reduce el consumo de la bomba de calor aire-agua significativamente más que lo obtenido en un estudio previo de este tipo de fachada [82]. El estudio previo obtuvo una reducción en el consumo del compresor de la bomba de calor de un 9.8%, mientras que el actual estudio obtuvo una reducción del 19,9%.

Aunque los dos estudios no emplean el mismo caso de estudio: (34 viviendas ubicadas en Bilbao en el estudio previo y 54 viviendas ubicadas en Madrid para el presente estudio), la mejora del COP de la bomba es comparable: 14,8% en el estudio previo y 13% en el caso del presente estudio sin estrategia *Tadaptativa*. Al emplear la estrategia *Tadaptativa*, la mejora del COP pasa a ser de un 17.4%.

Nótese que la reducción del consumo del compresor cuando no se aplica la estrategia *Tadaptativa* es de tan solo 3.1%, mucho menor que el caso de Bilbao analizado en el estudio previo. Muchos aspectos podrían valorarse como origen de esta diferencia, como la propia severidad climática de invierno, las diferencias técnicas en la instalación, etc. Sin embargo al aplicar la estrategia *Tadaptativa* se contrarrestan todos esos efectos.

4.6. Conclusiones del capítulo.

La determinación del efecto de una FVFF en la mejora de la eficiencia energética a escala de edificio, se ha hecho a partir de la comparativa de los resultados obtenidos mediante simulación para un caso de estudio. Este ha consistido en un edificio residencial sin fachada ventilada tomado como caso de referencia y el mismo edificio incorporando una FVFF tomado como caso de mejora. La localidad definida para el caso de estudio ha sido la ciudad de Madrid. Como herramienta BES ha sido empleado el software DesignBuilder, cuyo motor de cálculo es EnergyPlus.

El software de simulación energética de edificios DesignBuilder, ha mostrado su capacidad de representar y estimar el consumo energético de Bombas de Calor Aerotérmicas por medio de su componente denominado “HVAC detallado”.

El análisis del efecto de una FVFF conectada a los evaporadores de las Bombas de Calor Aerotérmicas de calefacción y de ACS en una simulación DesignBuilder fue posible debido a la combinación de dos herramientas: Por una parte, el modelo numérico de la FVFF que permitió predecir la ganancia de temperatura del flujo de aire en la cámara ventilada forzada. Y por otra parte, la capacidad del componente “HVAC detallado” de definir temperatura variable para el aire que entra al evaporador, a partir de un fichero horario leído mediante un script programable.

El modelo de edificio del caso de estudio ha sido definido a partir de los requerimientos constructivos y de uso y ocupación del CTE. Por este motivo, este edificio puede catalogarse como Edificio de consumo de Energía Casi Nulo EECN (nZEB por sus siglas en inglés).

El sistema definido para climatización ha sido un sistema de baja temperatura por suelo radiante, que por una parte permite trabajar a la Bomba de calor aerotérmica en condiciones de rendimiento más favorables, y por otra parte permitió comprobar el efecto de usar la estructura del edificio como sistema inercial para la acumulación de energía térmica.

La incorporación de la FVFF al modelo de simulación del edificio se ha hecho contemplando los aspectos físicos más trascendentales de interés para un proyecto que fuese a tener una ejecución real.

- El primero, el espacio físico disponible para la instalación de tramos de fachada ventilada continuos en altura.
- Segundo, que la sumatoria de “conductos disponibles”, cada uno con un caudal de extracción en alta de 200 l/s, consiguieran suplir los 7600 l/s a máxima velocidad exigidos por el evaporador de la Bomba de calor según catálogo.
- Tercero, la generación eléctrica de los vidrios fotovoltaicos se corresponde con su ubicación en el edificio, y aunque han sido representados como una banda continua vertical para facilitar su definición y cálculo dentro del software, esta representación implica un área de generador fotovoltaico equivalente.
- Cuarto, debido a que el consumo de los ventiladores propios del evaporador ya está incluido en el COP de la máquina, y que se garantiza que este caudal es perfectamente suministrable por extracción desde la FVFF, el consumo energético de mover el caudal

de aire a través de la FVFF no ha sido contabilizado. Es posible tener diferencias debido a aspectos como pérdidas de carga o cambios de densidad a lo largo del día. Sin embargo, la predicción de ganancia térmica en la cámara ventilada de la FVFF es altamente conservativa y se espera que compense tales diferencias.

El presente capítulo de análisis a escala de edificio ha permitido cerrar el círculo de la investigación que constituye la presente Tesis Doctoral, pues demuestra cuantitativamente la viabilidad de la hipótesis planteada desde un inicio: “una fachada ventilada forzada fotovoltaica FVFF puede usarse como foco de calor para mejorar la eficiencia del sistema edificio cuando este es calefactado mediante Bomba de calor”. Los resultados obtenidos para el caso de estudio han expuesto dos conclusiones fundamentales:

- Es posible mejorar la eficiencia del sistema edificio usando una FVFF como fuente de calor para una Bomba de calor aerotérmica reduciendo el consumo de la misma en una cantidad tan significativa como una quinta parte;
- Tal nivel de reducción del consumo se obtiene siempre y cuando exista una estrategia de acumulación energética para aprovechar al máximo los momentos de mayor eficiencia de la combinación FVFF – Bomba de calor.

Estas dos circunstancias a su vez han dado lugar a desarrollos propios de esta investigación: por una parte un modelo numérico que ha permitido la predicción de la ganancia térmica del caudal de aire a su paso por la FVFF, y por otra la definición de una “temperatura de consigna adaptativa”, que permite al edificio conseguir reducir el consumo mediante acumulación energética por el efectos de la inercia térmica de los forjados.

CAPITULO 5

Conclusiones y futuras líneas de trabajo

RESUMEN

Aunque en los capítulos anteriores se han incluido conclusiones parciales, en el presente capítulo se juntan las conclusiones globales de la presente Tesis, así como las líneas de investigación que le dan continuidad y mayor alcance.

5.1. Conclusiones.

Esta Tesis ha constituido un estudio integral de una fachada ventilada forzada fotovoltaica FVFF que ha implicado tres etapas:

- Una caracterización experimental en condiciones reales, mediante una célula de ensayos PASLINK.
- El desarrollo de un modelo matemático de elementos finitos de la ganancia térmica de esta solución de fachada, obtenido y validado a partir de dichos datos experimentales.
- El análisis del impacto de esta solución en la reducción energética a nivel edificio mediante simulación de un caso práctico.

La célula de ensayos PASLINK empleada en la fase experimental fue objeto de una mejora en su precisión de medida con base en el tratamiento de datos de su ensayo de calibración previo. Esta mejora no solo fue trasladada a los ensayos de la FVFF sino a todos los realizados por esta célula en general.

La FVFF ha mostrado cualidades que le proporcionan un carácter singular e innovador y que, sin embargo, no le imposibilitan un uso práctico. Por una parte, la hoja fotovoltaica exterior está formada por elementos denominados “vidrios fotovoltaicos” ya existentes en el mercado y de bajo coste. Por otra, su carácter de fachada activa en la que el flujo de aire interior forzado cambia de un valor base y siempre activado de 20 l/s a un valor alto y ocasional de 200 l/s. Este último modo de operación se produce en aquellos instantes en los que la fachada tiene una ganancia térmica neta. Los instantes de ganancia térmica neta fueron definidos como aquellos en los que la superficie de la hoja exterior de fachada es 5 °C superior a la temperatura exterior.

La muestra ensayada permitió comprobar que en esta situación el flujo de aire alcanza rápidamente la condición de flujo desarrollado, tanto en temperatura como en velocidades. Esto implica que en una fachada real con una altura superior a los 2,7 m de la muestra, la ganancia de temperatura será algo mayor, aunque no muy alejada de la obtenida en la muestra. También implica que las predicciones de ganancia térmica hechas por el modelo desarrollado y por tanto el impacto energético predicho por la simulación, son estimaciones conservadoras.

La validación con los datos experimentales del modelo predictivo del campo de temperatura de la sección de FVFF mostró su validez para diversas condiciones de operación de la fachada: diurnas, nocturnas, bajo caudal de extracción, alto caudal de extracción, invierno y verano. Esta capacidad por parte del modelo se debe a las características del proceso de ensayo y tratamiento de datos de la metodología PASLINK, el nivel de detalle en la instrumentación y a que fue posible realizar ensayos en condiciones de invierno y de verano.

La integración de la FVFFa en el edificio requirió dar respuesta a dos condiciones limitantes habituales en los sistemas energéticos solar activos o pasivos: la ganancia térmica solar ocurre a baja temperatura, y hay un desfase temporal entre los periodos de mayor ganancia energética y los de mayor demanda del edificio. Para la primera se recurrió al suelo radiante como sistema de calefacción porque funciona a baja temperatura. Para la segunda se recurrió a una estrategia dinámica de control de la consigna de temperatura interior. Esta estrategia usa el propio edificio

como acumulador térmico aumentando la consigna cuando la fachada tiene mayor ganancia térmica y por lo tanto, cuando la bomba de calor funciona con mayor eficiencia.

Para el análisis a nivel de edificio, se eligió un caso de estudio de edificio residencial de 54 viviendas, ubicado en Madrid, con una bomba de calor para calefacción y otra para ACS. Los resultados obtenidos indican que, combinándola con un sistema de suelo radiante, el conjunto FVFF y BC reduce como mínimo en un 19,9% el consumo energético de calefacción y junto con la generación fotovoltaica de la hoja exterior, reduce como mínimo en un 20,7% el total anual incluyendo el ACS.

Existe una vía adicional de aprovechamiento de la FVFFa en su integración con el edificio, y es la de usar el aire extraído de la cámara de fachada en la ventilación del edificio. Bien se trate de apoyo a los recuperadores de calor o bien sea directamente usado como aire de renovación a través de diversas etapas de filtración. Esta vía queda como futura línea de investigación.

La tecnología de los vidrios fotovoltaicos está en contante desarrollo, aumentando su eficiencia y su funcionalidad. Resulta de interés para futuros estudios, valorar mediante nuevos ensayos el impacto que el uso de otros tipos de vidrios fotovoltaicos tiene en el rendimiento de la FVFFa.

La caracterización térmica experimental de una fachada ventilada forzada fotovoltaica activa (FVFFa) ha demostrado su capacidad de ser un foco térmico por sus cualidades como captador de energía solar, y la predicción de su aporte energético a un edificio ha demostrado su viabilidad para ser considerada una tecnología de apoyo a la bomba de calor.

El estudio integral expuesto en este trabajo respalda el uso de FVFFa como tecnología a ser tomada en cuenta en el actual periodo de transición energética 2020-2030, dentro del actual proceso de cambio del modelo energético Europeo..

5.2. Futuras líneas de trabajo.

5.2.1. Montaje y monitorización de una FVFF en un edificio.

Con base en el conocimiento aportado en esta Tesis Doctoral, es posible estimar el aporte energético de una solución FVFF empleada como envolvente de rehabilitación térmica en proyecto de nueva construcción, ya sea terciario o residencial. El aspecto de una fachada de este tipo instalada en un edificio puede apreciarse en la Figura 5.1. Además del apoyo a la eficiencia energética del edificio, estas fachadas aportan un importante componente estético.

En el caso de rehabilitación energética, es necesario que el proyecto contemple la reconversión de los emisores térmicos existentes a un sistema de emisores de baja temperatura, de forma que la calefacción pueda ser cubierta parcial o totalmente por una bomba de calor. En nueva construcción el sistema de emisión a baja temperatura estaría contemplado desde el proyecto.

Algunos de los hitos que forman parte del proyecto montaje de una FVFF

- Definir la superficie de fachada disponible para la instalación de módulos fotovoltaicos opacos, tanto en dimensión como en orientación. Comprobar que se dispondría del número de carriles suficientes para que la FVFF suministre el caudal requerido por la, o las, bombas de calor. Para esta definición se debe contar con el proyecto básico de envolvente y de las instalaciones de calefacción, ACS y ventilación. En rehabilitación este último componente puede estar o no disponible.
- Simulación energética del edificio con la FVFF integrada a las instalaciones del edificio. Con la orientación y ubicación, el modelo matemático de la FVFF determina la ganancia térmica hora a hora de la fachada, y este dato alimenta la simulación energética. Se prueban posibles estrategias para la consigna de temperatura adaptativa. En este punto el proceso se hace iterativo, porque la integración de la FVFF puede dar lugar a posibles redimensionamientos en las instalaciones.
- Definición de sistemas de control, tanto de los niveles de caudal en la extracción de la fachada como de la temperatura de consigna adaptativa.

Finalmente, un seguimiento del comportamiento y rendimiento energético de la fachada mediante un sistema de monitorización permite validar el grado de certidumbre de las previsiones hechas en fase proyecto.



Figura 5.1 –Fachada Ventilada Fotovoltaica Opaca en un edificio en planta ático de edificio terciario.

5.2.1. Caracterización y modelado de otras configuraciones de FVFF.

Todo el proceso expuesto en el desarrollo de esta tesis doctoral de caracterización, modelado y análisis a escala de edificio, es aplicable para el estudio de variaciones de la solución FVFF. De esta forma se determinaría el efecto que tiene el cambio de muro base, espesor de cámara, caudales de extracción y tipo de hoja exterior, entre otras.

5.2.2. Análisis de soluciones de fachada en general.

Los pasos seguidos en la metodología de esta tesis, en sí mismos constituyen un método de análisis de soluciones constructivas, a la hora de determinar su impacto en el consumo energético a nivel edificio.

Destaca en particular, la obtención y validación de un modelo numérico del elemento ensayado a partir del modelo RC obtenido por el ajuste LORD del ensayo PASLINK. El importante grado de ajuste conseguido en el modelado numérico de la FVFF expone que es posible la obtención de modelos numéricos para elementos de edificación en general.

Sin embargo, llevar este modelado al análisis a escala de edificio requiere la certeza de que el modelado del elemento de edificación así obtenido es extrapolable a dicha escala.

5.2.3. Estudios de sensibilidad para la aplicación de la hibridación FVFF+BdC

El análisis a escala de edificio hecho para la ciudad de Madrid puede repetirse en diferentes localidades del Estado o de Europa, para la solución FVFF caracterizada. Esto por sí solo generará un criterio de idoneidad de la hibridación FVFF+BdC según la climatología. Si además se cuenta con la posibilidad de representar diversas variaciones de la solución FVFF, esto permitiría realizar un análisis de sensibilidad de multiparámetros.

ANEXO A

Publicación 1. Determinación dinámica de efectos de borde en célula PASLINK.

RESUMEN

En el volumen 210 de 2020 de la revista científica Energy& Buildings (disponible online desde diciembre de 2019), se publicó el trabajo denominado: “*Dynamical edge effect factor determination for building components thermal characterization under outdoor test conditions in a PASLINK test cell: A methodological proposal*”. Esta publicación corresponde al trabajo de mejora de la precisión de la célula PASLINK, expuesto en el capítulo 2. Solo se muestra la portada por temas de derechos editoriales.

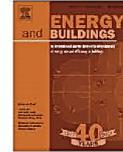
Energy & Buildings 210 (2020) 109741



Contents lists available at ScienceDirect

Energy & Buildings

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enbuild



Dynamical edge effect factor determination for building components thermal characterization under outdoor test conditions in a PASLINK test cell: A methodological proposal



C. García-Gáfaró*, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal, A. Erkoreka-González, K. Martín-Escudero

ENEDI Research Group, Faculty of Engineering of Bilbao, University of the Basque Country (UPV/EHU), Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain

ARTICLE INFO

Article history:
Received 4 September 2019
Revised 8 December 2019
Accepted 26 December 2019
Available online 27 December 2019

Keywords:
Outdoor test cells
PASLINK
Dynamic testing
Heat flow measurement accuracy
Edge factor
Border thermal bridge characterization

ABSTRACT

The thermal characterization of building components in dynamic exterior conditions is crucial for understanding their real performance, particularly if they are passive or active solar elements. In this respect, the PASLINK methodology has stood out as an effective technique for outdoor testing due to its level of development and precision. It is based on the use of a calibrated test cell with interior walls covered by heat flow meters. The accurate determination of the heat flow through the envelope of the cell is essential for the subsequent thermal analysis of the passive/active solar component being tested.

Although the walls of a PASLINK cell have a high thermal resistance and minimal thermal bridges, a higher heat flux is inevitable near the inner corners because of the edge effects. This variation is partially detected by heat flow meters, requiring correction factors accordingly named 'edge effect factors'. Additional heat flow meters strategically arranged in some interior corners are used to determine these factors in a calibration test. The factors thus calculated are used as invariable values in subsequent cell tests. However, the skill and knowledge of the staff conducting the calibration test are fundamental, as human errors can affect this process.

This proposal outlines a more objective and reliable new methodology to determine edge effect correction factors. It is based on applying correlations of instantaneous readings of heat flow meters. These correlations are obtained in an initial PASLINK calibration test, but are valid for all subsequent tests. The factors calculated in this way depend on instantaneous test readings and, for this reason, they are dynamic values perfectly adapted to each test.

The calibration test of the cell called EGUZKI, located in Vitoria-Gasteiz (Northern Spain), is used to demonstrate the validity of the proposed method. With the current PASLINK calibration test methodology, the calibrated cell obtains a measurement error of 13%, while the proposed new dynamic methodology reduces this error to 6%.

Although this new methodology is determined in the context of a PASLINK test cell, it is an extensive method applicable to the correction of heat flow measurements affected by edge effects in general.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The calibrated test cell [1] using the PASLINK methodology [2], has demonstrated its great capacity and versatility for thermal characterization tests on building components under real dynamic external conditions [3]. Eleven countries participated in its development in a series of eight consecutive and occasionally simul-

taneous European projects over a decade [4–6]. Since its inception, this methodology was raised as a standard and has therefore generated manuals that specify the requirements of the facilities as well as the procedures and analysis techniques with which their tests should be executed [7]. With this degree of definition, the PASLINK methodology can be applied regardless of the place of installation, maintaining high levels of quality in precision and reliability. This was demonstrated by the replication of an inter-comparative test, called IQ-Test, between different European centres equipped with PASLINK cells [8–10].

* Corresponding author.
E-mail address: carlos.garciaga@ehu.eus (C. García-Gáfaró).

ANEXO B

Información complementaria al análisis a escala de edificio de la FVFF

RESUMEN

El análisis a escala de edificio de la FVFF se basa en el uso del software DesignBuilder. En el presente Anexo B se incluyen fichas técnicas, tablas y curvas que han servido de referencia para la definición de los modelos y escenarios de simulación del caso de estudio.

B.1. Anejos y tablas de los Documentos Básicos HE y HS.

Correspondientes a la versión publicada el 20 de diciembre de 2019.

B.1.1. Relativo a la ocupación y cargas internas (DB-HE).

B.1.1.1. Relativo a la ocupación y cargas internas (DB-HE).

B.1.1.1.1. Relativo a la ocupación y cargas internas (DB-HE).

Documento Básico HE Ahorro de energía
Anejo D. Condiciones operacionales y perfiles de uso

Anejo D Condiciones operacionales y perfiles de uso

- Los espacios del modelo térmico tendrán asociadas unas *condiciones operacionales* y *perfiles de uso* que se correspondan con el uso concreto de cada espacio.
- El conjunto de temperaturas de consigna de las *condiciones operacionales* y el *perfil de uso* para espacios de uso residencial privado, a efectos de cálculo de la demanda energética, serán las especificadas en la tabla a-Anejo D, la tabla b-Anejo D y la tabla c-Anejo D:

Tabla a-Anejo D. Condiciones operacionales de espacios acondicionados en uso residencial privado

		Horario (semana tipo)			
		0:00-6:59	7:00-14:59	15:00-22:59	23:00-23:59
Temperatura de Consigna Alta (°C)	Enero a Mayo	–	–	–	–
	Junio a Septiembre	27	–	25	27
	Octubre a Diciembre	–	–	–	–
Temperatura de Consigna Baja (°C)	Enero a Mayo	17	20	20	17
	Junio a Septiembre	–	–	–	–
	Octubre a Diciembre	17	20	20	17

Tabla b-Anejo D. Perfil de uso de espacios en uso residencial privado

Carga interna W/m ²		Horario (semana tipo)					
		0:00-6:59	7:00-14:59	15:00-17:59	18:00-18:59	19:00-22:59	23:00-23:59
Ocupación (sensible)	L	2,15	0,54	1,08	1,08	1,08	2,15
	S y F	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15	2,15
Ocupación (latente)	L	1,36	0,34	0,68	0,68	0,68	1,36
	S y F	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36
Iluminación	L, S y F	0,44	1,32	1,32	2,20	4,40	2,20
Equipos	L, S y F	0,44	1,32	1,32	2,20	4,40	2,20

L: día laboral, S: sábado, F: domingo y festivo.

B.1.2. Relativo a la ocupación mínima y a la demanda de referencia de ACS (DB-HE).

Documento Básico HE Ahorro de energía
Anejo F. Demanda de referencia de ACS

Anejo F Demanda de referencia de ACS

- La demanda de referencia de ACS para edificios de uso residencial privado se obtendrá considerando unas necesidades de 28 litros/día-persona (a 60°C), una ocupación al menos igual a la mínima establecida en la tabla a-Anejo F y, en el caso de viviendas multifamiliares, un factor de centralización de acuerdo a la tabla b-Anejo F, incrementadas de acuerdo con las pérdidas térmicas por distribución, acumulación y recirculación.

Tabla a-Anejo F. Valores mínimos de ocupación de cálculo en uso residencial privado

Número de dormitorios	1	2	3	4	5	6	≥6
Número de Personas	1,5	3	4	5	6	6	7

Tabla b-Anejo F. Valor del factor de centralización en viviendas multifamiliares

Nº viviendas	N≤3	4≤N≤10	11≤N≤20	21≤N≤50	51≤N≤75	76≤N≤100	N≥101
Factor de centralización	1	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70

Relativo al perfil horario de demanda diaria del ACS (DB-HE).

Tabla c-Anejo D. Perfil de uso de ACS de espacios en uso residencial privado

Hora	%	Hora	%	Hora	%	Hora	%
0h	1	6h	3	12h	5	18h	5
1h	0	7h	10	13h	5	19h	7
2h	0	8h	7	14h	4	20h	6
3h	0	9h	7	15h	3	21h	6
4h	0	10h	6	16h	4	22h	5
5h	1	11h	6	17h	4	23h	5

El % se refiere al tanto por ciento respecto a la demanda diaria de ACS.

B.1.3. Relativo a la temperatura del agua de red (DB-HE).

Anejo G Temperatura del agua de red

1 Temperatura media mensual del agua de red

- 1 La tabla a-Anejo G contiene la temperatura diaria media mensual (°C) del agua fría de red para las capitales de provincia, para su uso en el cálculo del consumo de ACS:

Tabla a-Anejo G. Temperatura diaria media mensual de agua fría (°C)

Capital de provincia	Altitud	EN	FE	MA	AB	MY	JN	JL	AG	SE	OC	NO	DI
A Coruña	26	10	10	11	12	13	14	16	16	15	14	12	11
Albacete	686	7	8	9	11	14	17	19	19	17	13	9	7
Alicante/Alacant	8	11	12	13	14	16	18	20	20	19	16	13	12
Almería	16	12	12	13	14	16	18	20	21	19	17	14	12
Ávila	1131	8	8	7	9	11	14	17	16	14	11	8	6
Badajoz	186	9	10	11	13	15	18	20	20	18	15	12	9
Barcelona	12	9	10	11	12	14	17	19	19	17	15	12	10
Bilbao/Bilbo	6	9	10	10	11	13	15	17	17	16	14	11	10
Burgos	929	5	6	7	9	11	13	16	16	14	11	7	6
Cáceres	459	9	10	11	12	14	18	21	20	19	15	11	9
Cádiz	14	12	12	13	14	16	18	19	20	19	17	14	12
Castellón/Castelló	27	10	11	12	13	15	18	19	20	18	16	12	11
Ceuta	40	11	11	12	13	14	16	18	18	17	15	13	12
Ciudad Real	628	7	8	10	11	14	17	20	20	17	13	10	7
Córdoba	106	10	11	12	14	16	19	21	21	19	16	12	10
Cuenca	999	6	7	8	10	13	16	18	18	16	12	9	7
Girona	70	8	9	10	11	14	16	19	18	17	14	10	9
Granada	683	8	9	10	12	14	17	20	19	17	14	11	8
Guadalajara	685	7	8	9	11	14	17	19	19	16	13	9	7
Huelva	30	12	12	13	14	16	18	20	20	19	17	14	12
Huesca	488	7	8	10	11	14	16	19	18	17	13	9	7
Jaén	568	9	10	11	13	16	19	21	21	19	15	12	9
Las Palmas de Gran Canaria	13	15	15	16	16	17	18	19	19	19	18	17	16
León	838	6	6	8	9	12	14	16	16	15	11	8	6
Lleida	182	7	9	10	12	15	17	20	19	17	14	10	7
Logroño	385	7	8	10	11	13	16	18	18	16	13	10	8
Lugo	454	7	8	9	10	11	13	15	15	14	12	9	8
Madrid	655	8	8	10	12	14	17	20	19	17	13	10	8
Málaga	11	12	12	13	14	16	18	20	20	19	16	14	12
Melilla	15	12	13	13	14	16	18	20	20	19	17	14	13
Murcia	39	11	11	12	13	15	17	19	20	18	16	13	11
Ourense	139	8	10	11	12	14	16	18	18	17	13	11	9
Oviedo	232	9	9	10	10	12	14	15	16	15	13	10	9
Palencia	734	6	7	8	10	12	15	17	17	15	12	9	6
Palma de Mallorca	15	11	11	12	13	15	18	20	20	19	17	14	12
Pamplona/Iruña	490	7	8	9	10	12	15	17	17	16	13	9	7
Pontevedra	27	10	11	11	13	14	16	17	17	16	14	12	10
Salamanca	800	6	7	8	10	12	15	17	17	15	12	8	6
San Sebastián	12	9	9	10	11	12	14	16	16	15	14	11	9
Santa Cruz de Tenerife	5	15	15	16	16	17	18	20	20	20	18	17	16
Santander	11	10	10	11	11	13	15	16	16	16	14	12	10
Segovia	1002	6	7	8	10	12	15	18	18	15	12	8	6
Sevilla	11	11	11	13	14	16	19	21	21	20	16	13	11
Soria	1063	5	6	7	9	11	14	17	16	14	11	8	6
Tarragona	69	10	11	12	14	16	18	20	20	19	16	12	11
Teruel	912	6	7	8	10	12	15	18	17	15	12	8	6
Toledo	629	8	9	11	12	15	18	21	20	18	14	11	8
Valencia	13	10	11	12	13	15	17	19	20	18	16	13	11
Valladolid	698	6	8	9	10	12	15	18	18	16	12	9	7
Vitoria-Gasteiz	540	7	7	8	10	12	14	16	16	14	12	8	7
Zamora	649	6	8	9	10	13	16	18	18	16	12	9	7
Zaragoza	199	8	9	10	12	15	17	20	19	17	14	10	8

B.1.4. Relativo a la ventilación (DB-HS).

Documento Básico HS Salubridad
HS 3 Calidad del aire interior

Tabla 2.1 Caudales mínimos para ventilación de caudal constante en locales habitables

Tipo de vivienda	Caudal mínimo q_v en l/s				
	Locales secos ^{(1) (2)}			Locales húmedos ⁽²⁾	
	Dormitorio principal	Resto de dormitorios	Salas de estar y comedores ⁽³⁾	Mínimo en total	Mínimo por local
0 ó 1 dormitorios	8	-	6	12	6
2 dormitorios	8	4	8	24	7
3 o más dormitorios	8	4	10	33	8

(1) En los *locales* secos de las viviendas destinados a varios usos se considera el caudal correspondiente al uso para el que resulte un caudal mayor

(2) Cuando en un mismo *local* se den usos de *local* seco y húmedo, cada zona debe dotarse de su caudal correspondiente

(3) Otros *locales* pertenecientes a la vivienda con usos similares (salas de juego, despachos, etc.)

B.2. Catálogos de especificaciones técnicas de las Bombas de Calor de Calefacción y ACS.

B.2.1. Bomba de Calor AquaSnap 30 RQS

A continuación, se adjuntan el catálogo de la serie de Bombas de Calor 30QR de la marca Carrier, a la que pertenece la bomba empleada en la calefacción del modelo de caso de estudio.



Carrier Technologies

DATOS SELECCIÓN DE PRODUCTO



- Aplicaciones comerciales e industriales
- Diseño compacto
- Funcionamiento silencioso
- Caudal de agua variable (opcional)
- Recuperación parcial de calor

Enfriadoras de líquido condensadas por aire
Bombas de calor aire-agua reversibles

30RB 039-160/30RQ 039-160

AQUASNAP



CARRIER participates in the ECP programme for LGR/HP
Check ongoing validity of certificate :
www.eurovent-certification.com
www.certiflash.com



Datos físicos, 30RQS

30RQS		039	045	050	060	070	078	080	090	100	120	140	160
Aplicaciones de aire acondicionado según la norma EN14511-3:2011*													
Condición 1													
Capacidad frigorífica nominal	kW	38	43	50	59	64	74	78	86	96	113	132	149
EER	kW/kW	2,84	2,70	2,65	2,77	2,70	2,58	2,79	2,70	2,70	2,69	2,77	2,58
Clase Eurovent, refrigeración		C	C	D	C	C	D	C	C	C	D	C	D
ESEER	kW/kW	3,80	3,77	3,81	3,61	3,61	3,57	3,84	3,77	3,88	4,04	3,75	3,67
Condición 2													
Capacidad frigorífica nominal	kW	48	54	63	71	79	93	97	108	118	143	163	187
EER	kW/kW	3,28	3,16	3,09	3,12	3,08	2,97	3,19	3,14	3,10	3,10	3,17	2,92
Aplicaciones de aire acondicionado**													
Condición 1													
Capacidad frigorífica nominal	kW	38	44	50	59	64	74	78	86	96	114	132	150
EER	kW/kW	2,92	2,78	2,72	2,84	2,78	2,64	2,85	2,77	2,76	2,76	2,84	2,64
ESEER	kW/kW	4,00	4,00	4,03	3,80	3,81	3,75	4,00	4,00	4,12	4,30	4,00	3,92
Condición 2													
Capacidad frigorífica nominal	kW	48	55	64	72	80	94	98	109	119	144	164	188
EER	kW/kW	3,40	3,28	3,20	3,23	3,20	3,07	3,28	3,24	3,20	3,20	3,28	3,02
Aplicaciones de calefacción según la norma EN14511-3:2011*													
Condición 1													
Capacidad calorífica nominal	kW	42	47	53	61	70	78	80	93	101	117	138	158
COP	kW/kW	3,08	3,05	3,03	3,03	3,06	2,87	3,08	3,02	3,09	3,06	3,07	2,97
Clase Eurovent, calefacción		B	B	B	B	B	C	B	B	B	B	B	C
Condición 2													
Capacidad calorífica nominal	kW	43	47	55	63	71	80	83	95	103	121	141	162
COP	kW/kW	3,72	3,72	3,76	3,73	3,72	3,47	3,74	3,74	3,77	3,73	3,73	3,59
Aplicaciones de calefacción**													
Condición 1													
Capacidad calorífica nominal	kW	42	46	53	61	69	77	79	92	100	116	137	157
COP	kW/kW	3,12	3,09	3,07	3,08	3,11	2,91	3,11	3,06	3,12	3,10	3,10	3,01
Condición 2													
Capacidad calorífica nominal	kW	42	47	54	63	71	79	82	94	102	120	140	161
COP	kW/kW	3,80	3,80	3,83	3,81	3,80	3,53	3,80	3,80	3,84	3,80	3,80	3,65
Peso en funcionamiento***													
Unidad estándar (sin módulo hidráulico)	kg	506	513	539	552	553	560	748	895	903	959	1060	1078
Unidad estándar (con módulo hidráulico)													
Alta presión, bomba individual	kg	535	543	569	582	582	590	778	927	935	995	1099	1117
Alta presión, bomba doble	kg	561	569	594	608	608	616	804	972	980	1043	1136	1127
Niveles sonoros													
Unidad estándar													
Nivel de potencia sonora 10 ⁻¹² W****	dB(A)	80	81	81	86	87	87	84	84	84	84	90	90
Nivel de presión sonora a 10 m†	dB(A)	49	49	49	55	55	55	52	52	52	52	58	58
Unidad con opción 15LS (bajo nivel de ruido)													
Nivel de potencia sonora 10 ⁻¹² W****	dB(A)	79	80	80	80	80	80	83	83	83	83	83	83
Nivel de presión sonora a 10 m†	dB(A)	48	48	48	48	48	48	51	51	51	51	51	51
Dimensiones													
Longitud x profundidad x altura	mm	1090 x 2109 x 1330						2273 x 2136 x 1330					
Compresores													
		Scroll hermético, 48,3 r/s											
Circuito A		2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2
Circuito B		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	2
Número de etapas de capacidad		2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4
Refrigerante***													
		R-410A											
Circuito A	kg	12,5	13,5	16,5	17,5	18,0	16,5	21,5	27,5	28,5	33,0	19,0	18,5
Circuito B	kg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,0	18,5
Tipo de control													
		Pro-Dialog+											
Capacidad mínima	%	50	50	50	50	50	50	50	33	33	33	25	25

* Rendimientos certificado por Eurovent según la norma EN14511-3:2011.

Condición 1: Modo refrigeración: temperatura del agua de entrada/salida del evaporador 12°C/7°C, temperatura del aire exterior 35°C, factor de ensuciamiento del evaporador 0 m² K/W

Condición 2: Modo refrigeración: temperatura del agua de entrada/salida del evaporador 23°C/18°C, temperatura del aire exterior 35°C, factor de ensuciamiento del evaporador 0 m² K/W

Condición 1: Modo calefacción: temperatura del agua de entrada/salida del intercambiador de calor de agua 40°C/45°C, temperatura del aire exterior 7°C bs/6°C bh, factor de ensuciamiento del evaporador 0 m² K/W

Condición 2: Modo calefacción: temperatura del agua de entrada/salida del intercambiador de calor de agua 30°C/35°C, temperatura del aire exterior 7°C bs/6°C bh, factor de ensuciamiento del evaporador 0 m² K/W

** Rendimientos brutos, en desacuerdo con la norma EN14511-3:2011. Estos rendimientos no tienen en cuenta la corrección de la capacidad calorífica proporcional ni la aportación de potencia generada por la bomba de agua para superar la caída de presión interna en el intercambiador de calor.

Condición 1: Modo refrigeración: temperatura del agua de entrada/salida del evaporador 12°C/7°C, temperatura del aire exterior 35°C, factor de ensuciamiento del evaporador 0 m² K/W

Condición 2: Modo refrigeración: temperatura del agua de entrada/salida del evaporador 23°C/18°C, temperatura del aire exterior 35°C, factor de ensuciamiento del evaporador 0 m² K/W

Condición 1: Modo calefacción: temperatura del agua de entrada/salida del intercambiador de calor de agua 40°C/45°C, temperatura del aire exterior 7°C bs/6°C bh, factor de ensuciamiento del evaporador 0 m² K/W

Condición 2: Modo calefacción: temperatura del agua de entrada/salida del intercambiador de calor de agua 30°C/35°C, temperatura del aire exterior 7°C bs/6°C bh, factor de ensuciamiento del evaporador 0 m² K/W

*** El peso indicado es aproximado. Para averiguar la carga de refrigerante de la unidad, véase la placa de características de la misma

**** De acuerdo con la ISO 9614-1 y certificado por Eurovent

† Sólo a efectos de información, calculado a partir de los niveles de potencia sonora Lw(A)

Datos físicos, 30RQS (cont.)

30RQS		039	045	050	060	070	078	080	090	100	120	140	160
Intercambiador de calor de aire		Tubos de cobre acanalados y aletas de aluminio											
Ventiladores		Flying Bird IV axial con anillo exterior											
Cantidad		1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
Caudal de aire total (alta velocidad)	l/s	3800	3800	3800	5300	5300	5300	7600	7600	7600	7600	10600	10600
Velocidad	r/s	12	12	12	12	12	12	16	12	12	12	16	960
Intercambiador de calor de agua		Intercambiador de calor de placas de expansión directa, soldado											
Volumen de agua	l	2,6	3,0	4,0	4,8	4,8	5,6	8,7	8,7	9,9	11,3	12,4	14,7
Sin módulo hidrónico													
Presión de funcionamiento máxima del lado del agua	kPa	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Con módulo hidrónico (opción)		Bomba, filtro de pantalla Victaulic, válvula de seguridad, depósito de dilatación, válvulas de purgo agua + aire, manómetros											
Bomba individual o doble (según corresponda)													
Volumen del depósito de dilatación	l	12	12	12	12	12	12	35	35	35	35	35	35
Presión del depósito de dilatación††	bar	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Presión de funcionamiento máxima del lado del agua	kPa	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Conexiones de agua sin/con módulo hidrónico		Victaulic											
Diámetro	pulg.	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Diámetro exterior de tubo	mm	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3	60,3
Color de la pintura del chasis		Código del color: RAL7035											

†† A la entrega de la unidad, el preinflado estándar del depósito mantiene la membrana metalizada en la parte superior del depósito. Para cambiar el volumen de agua, debe cambiar la presión de inflado a un valor que esté próximo a la altura piezométrica del sistema.

Capacidades caloríficas

Unidad 30RQS

LWT °C	Temperatura del aire de entrada del intercambiador de calor de aire, bs (bh), °C																							
	-15 (-16)				-10 (-11)				-7 (-8)				2 (1)				7 (6)				12 (11)			
	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp
kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	
039 30	25	2,48	1,19	15	28	2,77	1,33	19	30	2,97	1,43	22	38	3,68	1,81	36	43	4,12	2,05	47	49	4,61	2,34	62
045	27	2,44	1,29	20	30	2,76	1,46	24	33	2,97	1,57	28	41	3,69	1,98	41	47	4,16	2,24	51	53	4,71	2,56	65
050	31	2,46	1,47	18	35	2,78	1,68	22	38	3,00	1,82	26	48	3,75	2,31	40	55	4,23	2,62	51	62	4,76	2,99	64
060	35	2,42	1,69	18	40	2,74	1,93	23	44	2,95	2,10	27	55	3,69	2,66	42	63	4,14	3,03	53	72	4,66	3,45	68
070	40	2,53	1,94	21	46	2,82	2,20	27	49	3,02	2,38	31	63	3,70	3,01	49	71	4,12	3,43	62	82	4,59	3,92	80
078	45	2,36	2,16	20	51	2,64	2,46	26	55	2,83	2,67	31	70	3,45	3,39	50	80	3,83	3,85	65	92	4,28	4,40	85
080	46	2,53	2,22	14	53	2,82	2,53	18	57	3,02	2,75	21	73	3,70	3,51	34	83	4,14	4,00	44	95	4,66	4,58	57
090	53	2,45	2,57	18	61	2,76	2,93	23	66	2,98	3,17	26	84	3,71	4,02	41	95	4,17	4,57	52	108	4,70	5,21	67
100	41	2,60	1,98	10	67	2,84	3,20	23	72	3,04	3,46	27	91	3,74	4,36	41	103	4,19	4,95	52	118	4,71	5,65	67
120	68	2,57	3,26	21	77	2,87	3,71	26	84	3,06	4,03	31	107	3,73	5,14	50	122	4,15	5,85	64	139	4,64	6,69	83
140	80	2,53	3,86	23	91	2,81	4,36	29	98	3,01	4,71	34	124	3,70	5,97	53	141	4,13	6,80	68	162	4,64	7,77	88
160	-	-	-	-	104	2,75	5,01	31	113	2,93	5,42	36	143	3,56	6,89	58	163	3,96	7,84	74	187	4,43	8,96	97
039 35	25	2,28	1,20	15	28	2,56	1,34	19	30	2,74	1,44	22	37	3,38	1,80	35	42	3,78	2,04	45	48	4,21	2,32	59
045	27	2,20	1,32	20	31	2,51	1,48	24	33	2,71	1,59	27	41	3,37	1,98	40	47	3,78	2,24	50	53	4,26	2,54	63
050	31	2,22	1,48	17	35	2,50	1,68	22	38	2,70	1,82	25	48	3,38	2,30	39	54	3,81	2,60	49	62	4,30	2,97	62
060	35	2,20	1,69	17	40	2,49	1,93	22	43	2,69	2,09	26	55	3,37	2,65	40	62	3,79	3,01	51	71	4,25	3,43	65
070	41	2,33	1,95	21	46	2,59	2,20	26	49	2,77	2,38	31	62	3,39	3,00	47	71	3,77	3,41	60	81	4,20	3,89	76
078	45	2,16	2,18	20	51	2,42	2,46	25	55	2,59	2,66	30	70	3,17	3,35	48	79	3,51	3,80	62	90	3,92	4,35	81
080	46	2,30	2,22	14	52	2,58	2,51	18	57	2,77	2,72	21	72	3,39	3,46	33	82	3,78	3,95	42	94	4,25	4,51	54
090	53	2,22	2,56	17	61	2,51	2,92	22	66	2,71	3,16	25	83	3,37	4,00	40	94	3,79	4,54	50	108	4,26	5,18	65
100	41	2,39	1,99	9	67	2,60	3,22	23	72	2,78	3,47	26	90	3,41	4,35	40	102	3,82	4,93	50	117	4,30	5,62	64
120	68	2,34	3,26	20	77	2,61	3,70	26	83	2,80	4,00	30	105	3,41	5,07	47	120	3,78	5,77	61	137	4,22	6,60	79
140	81	2,33	3,89	23	91	2,58	4,38	29	98	2,76	4,73	33	124	3,38	5,95	51	140	3,78	6,75	66	160	4,25	7,71	85
160	92	2,24	4,42	24	104	2,51	5,01	30	112	2,69	5,41	35	142	3,27	6,83	55	161	3,64	7,75	71	184	4,06	8,86	92
039 40	25	2,03	1,23	15	28	2,32	1,35	19	30	2,50	1,45	22	37	3,08	1,79	34	42	3,44	2,02	44	48	3,84	2,29	57
045	28	1,91	1,33	20	31	2,25	1,49	24	33	2,44	1,60	27	41	3,06	2,00	40	47	3,43	2,25	49	53	3,86	2,53	61
050	31	2,00	1,49	17	35	2,25	1,68	21	38	2,42	1,82	25	47	3,03	2,29	37	54	3,42	2,58	47	61	3,87	2,94	59
060	35	1,98	1,67	17	40	2,25	1,91	21	43	2,43	2,08	25	55	3,04	2,64	39	62	3,43	2,98	49	70	3,86	3,39	62
070	41	2,15	1,96	21	46	2,37	2,21	26	49	2,53	2,38	30	62	3,08	2,99	45	70	3,42	3,38	57	80	3,82	3,84	73
078	46	1,96	2,20	20	51	2,20	2,47	25	55	2,36	2,66	29	69	2,89	3,33	46	78	3,20	3,76	59	89	3,56	4,28	76
080	46	2,09	2,23	14	52	2,34	2,51	17	56	2,51	2,71	20	71	3,08	3,42	31	81	3,44	3,89	39	92	3,86	4,44	51
090	53	2,00	2,54	16	60	2,26	2,90	21	65	2,44	3,15	25	83	3,04	3,98	38	93	3,42	4,50	49	106	3,85	5,12	62
100	59	2,15	2,85	18	67	2,37	3,22	22	72	2,53	3,47	26	90	3,09	4,33	39	102	3,46	4,89	49	115	3,90	5,56	62
120	68	2,11	3,29	20	77	2,36	3,70	25	83	2,53	3,99	29	104	3,08	5,02	45	118	3,43	5,69	58	135	3,82	6,49	75
140	81	2,14	3,90	22	91	2,36	4,39	28	98	2,52	4,73	32	123	3,07	5,92	50	139	3,44	6,69	63	158	3,87	7,62	81
160	93	2,03	4,48	24	104	2,28	5,03	30	112	2,44	5,41	34	141	2,98	6,77	53	159	3,31	7,67	68	181	3,69	8,74	88
039 45	-	-	-	-	28	2,08	1,37	19	30	2,24	1,46	21	37	2,77	1,78	33	42	3,10	2,00	42	47	3,47	2,26	54
045	-	-	-	-	31	1,97	1,49	23	33	2,16	1,60	26	41	2,73	1,99	39	46	3,08	2,24	48	52	3,47	2,53	57
050	16	1,83	0,79	5	35	2,02	1,69	21	38	2,17	1,82	24	47	2,70	2,27	36	53	3,05	2,56	45	60	3,46	2,90	57
060	18	1,70	0,86	5	39	2,01	1,89	20	-	-	-	-	54	2,71	2,59	37	61	3,06	2,94	47	69	3,45	3,34	59
070	41	1,97	1,96	20	-	-	-	-	49	2,29	2,37	29	61	2,78	2,95	44	69	3,09	3,33	55	78	3,44	3,78	69
078	24	1,79	1,17	5	52	1,99	2,49	25	55	2,13	2,66	28	68	2,61	3,29	44	77	2,90	3,71	56	87	3,22	4,22	72
080	47	1,88	2,26	14	52	2,11	2,52	17	56	2,26	2,70	19	70	2,78	3,37	30	79	3,10	3,82	37	90	3,47	4,35	48
090	52	1,79	2,51	16	59	2,02	2,86	20	64	2,17	3,11	23	81	2,71	3,93	37	92	3,05	4,45	46	105	3,44	5,06	59
100	41	2,00	1,99	9	67	2,16	3,22	22	72	2,29	3,46	25	89	2,78	4,30	37	100	3,11	4,84	47	114	3,50	5,49	59
120	47	1,96	2,29	10	77	2,12	3,71	25	82	2,27	3,98	28	103	2,78	4,95	43	116	3,09	5,60	55	132	3,44	6,37	71
140	42	1,89	2,04	6	91	2,15	4,39	28	-	-	-	-	121	2,77	5,86	48	137	3,09	6,61	60	156	3,49	7,50	77
160	-	-	-	-	105	2,06	5,07	29	112	2,21	5,43	34	139	2,70	6,72	51	157	3,00	7,57	65	178	3,34	8,61	83
039 50	-	-	-	-	-	-	-	-	30	1,97	1,47	21	37	2,46	1,78	32	41	2,76	1,98	40	46	3,09	2,23	51
045	-	-	-	-	-	-	-	-	33	1,89	1,59	25	40	2,42	1,95	37	45	2,72	2,20	45	51	3,07	2,48	56
050	-	-	-	-	19	1,88	0,89	6	38	1,94	1,83	24	47	2,40	2,25	35	52	2,70	2,53	43	59	3,05	2,85	54
060	-	-	-	-	20	1,77	0,98	6	42	1,94	2,01	23	53	2,41	2,54	35	59	2,71	2,87	44	67	3,05	3,25	55
070	-	-	-	-	45	1,96	2,20	25	49	2,08	2,36	28	60	2,49	2,92	42	68	2,75	3,28	52	76	3,06	3,70	65
078	-	-	-	-	27	1,82	1,32	7	56	1,92	2,68	28	68	2,35	3,27	42	76	2,61	3,66	53	86	2,90	4,14	68
080	-	-	-	-	53	1,89	2,54	17	56	2,03	2,70	19	69	2,49	3,33	28	78	2,78	3,75	35	88	3,11	4,25	45
090	-	-	-	-	58	1,80	2,83	19	63	1,94	3,06	22	80	2,40	3,85	35	90	2,69	4,35	43	102	3,03	4,93	55
100	-	-	-	-	46	2,00	2,23	11	71	2,07	3,45	24	88	2,49	4,25	36	99	2,77	4,77	44	111	3,11	5,39	56

B.2.2. Bomba de Calor AquaSnap 61 AF

A continuación, se adjuntan el catálogo de la serie de Bombas de Calor 61 AF de la marca Carrier, a la que pertenece la bomba empleada en la producción de ACS del modelo de caso de estudio.



United Technologies



Quality and Environment Management Systems Approval

Bombas de calor aire/agua monobloc de alta temperatura con módulo hidrónico integrado

AQUASNAP
Heating



www.eurovent-certification.com
www.certiflash.com



Control del sistema de calefacción (accesorio)

61AF 022-105

Capacidad calorífica nominal 21-102 kW

La variedad de bombas de calor de alta temperatura Aquasnap se ha diseñado para fines comerciales, como la calefacción de oficinas, apartamentos y hoteles, así como la producción de agua caliente doméstica en edificios nuevos y restaurados.

Características

Las principales características de esta gama de productos son:

- Ahorro de energía
La gama 61AF está certificada según la clase A de la clasificación de eficiencia energética Eurovent con un coeficiente de rendimiento (COP) superior a 4. Así cumple el COP exigido por la certificación Ecolabel.
- Facilidad de instalación
Las bombas de calor Aquasnap de alta temperatura incorporan un módulo hidrónico opcional con bomba de varias velocidades.
- Fácil integración
El bajo nivel de ruido de la bomba de calor 61AF y su compacto chasis permiten reducir el ruido de la unidad.
- Flexibilidad de aplicación
El intervalo de funcionamiento permite temperaturas exteriores de hasta -20°C y temperaturas de salida del agua de hasta 65°C para aplicaciones domésticas de agua caliente.

■ Disponibilidad

- El control de la unidad inteligente permite el funcionamiento de la unidad en condiciones extremas, minimizándose los tiempos de apagado de la unidad.
- La producción de agua caliente a 65°C está continuamente disponible.

La calidad de Carrier es su garantía de seguridad y duración de la instalación.

La variedad de bombas de calor de alta temperatura incorpora las últimas innovaciones tecnológicas:

- compresores scroll con inyección de vapor
- ventiladores con bajo nivel sonoro, de material composite
- control por microprocesador autoadaptativo
- válvula de expansión electrónica
- bomba de varias velocidades.

Las bombas de calor de alta temperatura Aquasnap pueden equiparse con un módulo hidrónico que se integra en el chasis de la bomba de calor, limitándose la instalación a operaciones sencillas, como la conexión de alimentación eléctrica y de tubos de retorno, y el suministro del agua caliente.

Datos físicos

61AF		022	030	035	045	055	075	105
Aplicaciones de calefacción según la norma EN14511-3:2011*								
Condición 1								
Capacidad calorífica nominal	kW	20,8	25,7	32,3	43,8	52,3	66,9	101,9
COP	kW/kW	3,45	3,45	3,37	3,56	3,65	3,41	3,58
Clase Eurovent, calefacción	A	A	A	A	A	A	A	A
Condición 2								
Capacidad calorífica nominal	kW	20,8	25,7	32,3	43,7	52,2	66,8	101,7
COP	kW/kW	4,11	4,14	4,07	4,31	4,36	3,97	4,25
Aplicaciones de calefacción**								
Condición 1								
Capacidad calorífica nominal	kW	20,8	26,2	32,6	44,2	52,1	64,9	101,9
COP	kW/kW	3,46	3,47	3,39	3,58	3,67	3,43	3,61
Condición 2								
Capacidad calorífica nominal	kW	20,8	26,2	32,5	44,1	52,0	64,8	101,6
COP	kW/kW	4,13	4,17	4,10	4,34	4,39	4,00	4,29
Peso en funcionamiento***								
Unidad estándar (sin módulo hidrónico)	kg	343	396	421	509	533	900	1020
Unidad estándar (con módulo hidrónico)	kg	349	403	436	524	549	926	1044
Niveles sonoros								
Nivel de potencia sonora 10 ⁻¹² W****	dB(A)	81	82	83	85	84	84	85
Nivel de presión sonora a 10 m†	dB(A)	50	51	51	53	53	52	53
Dimensiones								
Longitud x profundidad x altura	mm	1110 x 1327 x 1330			1114 x 2100 x 1330		2273 x 2100 x 1330	
Compresor								
Hermético, de tipo scroll, 48,3 r/s								
Cantidad		1	1	1	1	1	2	2
Número de etapas de capacidad		1	1	1	1	1	2	2
Carga de refrigerante								
R-407C								
Carga	kg	8,0	8,8	9,7	10,0	13,2	22,0	26,5
Control de capacidad								
Pro-Dialog+								
Capacidad mínima	%	100	100	100	100	100	50	50
Condensadores								
Intercambiador de calor de placas de expansión directa, soldado								
Volumen de agua	l	4,9	6,4	8,2	9,6	12,1	16,4	22,7
Presión máx. de funcionamiento, lado de agua sin módulo hidrónico	kPa	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Presión máx. de funcionamiento, lado de agua con módulo hidrónico	kPa	400	400	400	400	400	400	400
Ventiladores								
Ventiladores axiales FLYING BIRD 4, con envoltorio giratoria								
Cantidad		1	1	1	1	1	2	2
Caudal de aire (alta velocidad)	l/s	3770	3748	3736	4035	4036	7479	8072
Velocidad, unidad estándar	r/s	12	12	12	12	12	12	12
Velocidad, unidad con opción 11	r/s	16	16	16	16	16	16	16
Evaporador								
Tubos de cobre ranurados y aletas de aluminio								
Módulo hidrónico (opción 116)								
Bomba simple a tres velocidades								
Bomba, filtro de pantalla Victaulic, válvula de seguridad, válvulas de purgo agua + aire, sensores de presión de cavitación								
Tipo de conexiones de agua (con y sin módulo hidrónico)								
Victaulic								
Conexiones††	pulg.	1-1/4	1-1/4	1-1/2	1-1/2	1-1/2	2	2
Diámetro exterior del tubo	mm	42,4	42,4	48,3	48,3	48,3	60,3	60,3
Color de la pintura del chasis								
Código del color: RAL7035								

* Rendimientos certificado por Eurovent según la norma EN14511-3:2011.

Condición 1: Modo calefacción: temperatura del agua de entrada/salida del intercambiador de calor de agua 40°C/45°C, temperatura del aire exterior 7°C bs/6°C bh

Condición 2: Modo calefacción: temperatura del agua de entrada/salida del intercambiador de calor de agua 30°C/35°C, temperatura del aire exterior 7°C bs/6°C bh

** Rendimientos brutos, en desacuerdo con la norma EN14511-3:2011. Estos rendimientos no tienen en cuenta la corrección de la capacidad calorífica proporcional ni la aportación de potencia generada por la bomba de agua para superar la caída de presión interna en el intercambiador de calor.

Condición 1: Modo calefacción: temperatura del agua de entrada/salida del intercambiador de calor de agua 40°C/45°C, temperatura del aire exterior 7°C bs/6°C bh

Condición 2: Modo calefacción: temperatura del agua de entrada/salida del intercambiador de calor de agua 30°C/35°C, temperatura del aire exterior 7°C bs/6°C bh

*** El peso indicado es aproximado. Para averiguar la carga de refrigerante de la unidad, véase la placa de características de la misma.

**** De conformidad con la norma ISO 9614-1, sólo a efectos de información.

† Sólo a efectos de información, calculado a partir de los niveles de potencia sonora Lw(A).

†† Las unidades 61AF 022 y 61AF 030 incluyen dos manguitos adaptadores de serie para las conexiones entre Victaulic 1-1/4" y la rosca 1-1/4".

Capacidades caloríficas según EN14511-3:2011

61AF 022-105		Temperatura del aire de entrada del intercambiador de calor de aire, bs (bh), °C																							
LWT °C	°C	-20 (-20,5)				-15 (-16)				-10 (-11)				-7 (-8)				2 (1)				7 (6)			
		Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa	Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa	Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa	Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa	Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa	Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa
022	30	9,0	1,95	0,49	1,2	10,3	2,20	0,58	1,6	11,5	2,47	0,66	2,1	12,3	2,63	0,72	2,5	15,2	3,38	0,91	3,8	21,1	4,48	1,01	4,6
030		10,5	1,95	0,58	1,1	12,1	2,19	0,68	1,5	13,7	2,44	0,79	2,0	14,7	2,60	0,86	2,4	18,5	3,34	1,11	3,8	26,5	4,52	1,27	4,9
035		13,5	2,05	0,74	1,5	15,5	2,29	0,86	2,0	17,5	2,54	1,01	2,6	18,8	2,70	1,10	3,0	23,6	3,39	1,41	4,7	32,6	4,45	1,57	5,7
045		18,0	2,25	0,99	1,8	20,5	2,49	1,15	2,4	23,2	2,75	1,33	3,2	24,9	2,91	1,46	3,7	31,6	3,58	1,89	5,9	44,4	4,71	2,13	7,4
055		21,8	2,33	1,19	2,0	25,1	2,58	1,40	2,6	28,4	2,86	1,63	3,5	30,5	3,03	1,78	4,1	37,9	3,66	2,27	6,3	52,3	4,73	2,51	7,6
075		28,1	2,04	1,54	2,2	32,3	2,29	1,81	3,0	36,6	2,55	2,10	4,0	39,3	2,72	2,30	4,7	49,5	3,43	2,96	7,4	64,3	4,29	3,08	8,0
105		41,8	2,21	2,29	3,5	47,2	2,42	2,64	4,6	53,5	2,68	3,08	6,2	57,5	2,84	3,36	7,3	72,5	3,50	4,33	11,9	102,2	4,59	4,90	15,0
022	35	9,0	1,84	0,49	1,2	10,2	2,06	0,57	1,6	11,5	2,30	0,66	2,1	12,3	2,45	0,72	2,4	15,1	3,13	0,90	3,7	20,8	4,11	1,00	4,4
030		10,5	1,85	0,58	1,1	12,1	2,06	0,68	1,5	13,7	2,29	0,79	2,0	14,7	2,43	0,86	2,3	18,5	3,09	1,11	3,7	26,2	4,14	1,26	4,7
035		13,4	1,92	0,73	1,4	15,3	2,13	0,86	1,9	17,3	2,35	1,00	2,5	18,6	2,49	1,09	2,9	23,4	3,10	1,40	4,5	32,6	4,07	1,57	5,5
045		18,1	2,11	0,99	1,8	20,6	2,32	1,15	2,4	23,1	2,55	1,33	3,1	24,9	2,69	1,45	3,6	31,3	3,29	1,87	5,7	44,2	4,31	2,12	7,2
055		21,8	2,18	1,20	1,9	25,0	2,39	1,40	2,6	28,3	2,64	1,63	3,4	30,4	2,79	1,78	4,0	38,0	3,39	2,27	6,2	52,1	4,35	2,50	7,4
075		27,9	1,91	1,53	2,1	32,1	2,13	1,79	2,9	36,4	2,36	2,09	3,8	39,1	2,51	2,28	4,5	49,1	3,14	2,93	7,1	64,9	3,97	3,12	8,0
105		41,9	2,08	2,30	3,5	47,4	2,26	2,65	4,6	53,5	2,48	3,08	6,0	57,4	2,63	3,36	7,1	72,3	3,23	4,32	11,5	101,9	4,24	4,89	14,6
022	40	8,9	1,72	0,49	1,2	10,1	1,90	0,57	1,5	11,2	2,09	0,66	2,0	11,9	2,21	0,71	2,3	14,9	2,87	0,90	3,5	20,8	3,77	1,00	4,3
030		10,5	1,73	0,58	1,1	12,0	1,91	0,68	1,5	13,4	2,09	0,79	1,9	14,3	2,21	0,86	2,3	18,3	2,84	1,10	3,6	26,0	3,78	1,25	4,6
035		13,2	1,78	0,73	1,4	15,0	1,95	0,85	1,8	16,8	2,12	0,99	2,4	18,0	2,23	1,08	2,8	23,0	2,82	1,38	4,3	32,6	3,72	1,57	5,4
045		18,1	1,97	1,00	1,8	20,4	2,14	1,16	2,3	22,6	2,31	1,33	3,0	24,1	2,42	1,45	3,5	31,0	3,00	1,86	5,5	44,1	3,93	2,12	7,0
055		21,7	2,03	1,20	1,9	24,7	2,20	1,40	2,5	27,7	2,38	1,63	3,3	29,5	2,50	1,77	3,9	37,9	3,11	2,28	6,1	52,2	3,99	2,51	7,3
075		27,7	1,78	1,53	2,1	31,5	1,96	1,79	2,8	35,4	2,14	2,08	3,7	37,8	2,25	2,27	4,3	48,4	2,87	2,91	6,9	65,8	3,68	3,17	8,0
105		42,0	1,95	2,31	3,4	47,1	2,09	2,67	4,5	52,5	2,26	3,08	5,9	56,0	2,37	3,36	7,0	71,7	2,97	4,31	11,2	101,9	3,91	4,90	14,3
022	45	9,0	1,65	0,49	1,2	10,2	1,81	0,57	1,5	11,2	1,97	0,66	2,0	11,9	2,07	0,71	2,3	14,9	2,62	0,90	3,5	20,8	3,44	1,00	4,2
030		10,6	1,67	0,58	1,1	12,1	1,83	0,68	1,5	13,5	1,98	0,79	1,9	14,3	2,07	0,86	2,2	18,1	2,60	1,09	3,5	25,7	3,45	1,24	4,4
035		13,3	1,70	0,73	1,3	15,1	1,84	0,85	1,8	16,8	1,99	0,98	2,3	17,9	2,08	1,07	2,7	22,7	2,56	1,37	4,2	32,3	3,37	1,56	5,2
045		18,5	1,88	1,01	1,8	20,7	2,02	1,17	2,3	22,9	2,17	1,34	3,0	24,2	2,25	1,45	3,5	30,8	2,73	1,86	5,4	43,8	3,56	2,11	6,8
055		22,1	1,94	1,21	1,9	25,1	2,08	1,41	2,5	27,9	2,23	1,63	3,2	29,6	2,32	1,78	3,8	37,7	2,83	2,27	5,9	52,3	3,64	2,52	7,2
075		28,1	1,70	1,53	2,0	31,8	1,85	1,79	2,7	35,5	2,01	2,08	3,6	37,8	2,10	2,26	4,2	48,2	2,62	2,90	6,7	66,9	3,41	3,22	8,1
105		42,9	1,88	2,34	3,4	48,0	1,99	2,70	4,5	53,1	2,13	3,11	5,9	56,3	2,22	3,38	6,9	71,7	2,72	4,31	11,0	101,9	3,58	4,91	14,0
022	50	9,1	1,55	0,50	1,1	10,3	1,69	0,58	1,5	11,4	1,83	0,66	1,9	12,0	1,92	0,72	2,3	14,9	2,38	0,90	3,4	20,9	3,13	1,01	4,2
030		10,7	1,58	0,58	1,1	12,2	1,72	0,68	1,4	13,5	1,85	0,79	1,9	14,3	1,93	0,86	2,2	18,0	2,38	1,08	3,4	25,4	3,13	1,23	4,2
035		13,3	1,59	0,73	1,3	15,1	1,72	0,85	1,7	16,8	1,85	0,98	2,2	17,9	1,92	1,07	2,6	22,6	2,33	1,36	4,0	32,0	3,04	1,55	5,1
045		18,8	1,77	1,02	1,8	21,0	1,89	1,18	2,3	23,1	2,01	1,35	3,0	24,4	2,08	1,46	3,4	30,8	2,48	1,85	5,3	43,6	3,21	2,10	6,6
055		22,3	1,83	1,22	1,9	25,3	1,95	1,42	2,5	28,2	2,07	1,65	3,2	29,9	2,14	1,79	3,8	37,8	2,57	2,28	5,8	52,7	3,32	2,54	7,1
075		28,2	1,60	1,53	2,0	31,9	1,73	1,80	2,7	35,6	1,87	2,08	3,5	37,9	1,95	2,27	4,1	48,0	2,39	2,90	6,5	68,1	3,15	3,28	8,2
105		43,4	1,78	2,37	3,4	48,6	1,88	2,73	4,5	53,7	1,98	3,14	5,9	57,0	2,06	3,41	6,9	71,9	2,48	4,33	10,8	102,0	3,27	4,92	13,8
022	55	9,2	1,51	0,31	0,5	10,4	1,64	0,36	0,6	11,5	1,77	0,42	0,8	12,1	1,85	0,45	0,9	15,0	2,29	0,56	1,4	20,9	3,02	0,63	1,8
030		10,7	1,53	0,37	0,4	12,2	1,66	0,43	0,6	13,6	1,79	0,50	0,8	14,4	1,87	0,54	0,9	17,9	2,29	0,68	1,4	25,3	3,02	0,76	1,7
035		13,4	1,54	0,46	0,6	15,1	1,66	0,53	0,7	16,8	1,78	0,61	1,0	17,9	1,86	0,67	1,1	22,5	2,25	0,85	1,7	31,9	2,94	0,97	2,1
045		19,0	1,72	0,65	0,8	21,2	1,83	0,74	1,0	23,3	1,95	0,85	1,3	24,6	2,02	0,92	1,5	30,7	2,40	1,16	2,2	43,5	3,13	1,31	2,8
055		22,4	1,78	0,77	0,8	25,5	1,88	0,90	1,0	28,4	1,99	1,04	1,4	30,2	2,06	1,13	1,6	37,8	2,46	1,43	2,4	52,9	3,19	1,60	3,0
075		28,3	1,54	0,96	0,8	32,1	1,67	1,13	1,1	35,8	1,80	1,31	1,5	38,1	1,87	1,42	1,7	48,0	2,29	1,81	2,7	68,0	3,02	2,06	3,4
105		43,7	1,74	1,49	1,4	49,1	1,82	1,72	1,9	54,1	1,92	1,98	2,4	57,5	1,99	2,15	2,8	72,0	2,39	2,72	4,4	102,0	3,15	3,08	5,6
022	60	9,3	1,45	0,25	0,3	10,5	1,56	0,30	0,4	11,6	1,68	0,34	0,6	12,3	1,75	0,37	0,6	15,0	2,14	0,45	0,9	21,0	2,81	0,51	1,2
030		10,8	1,47	0,30	0,3	12,3	1,59	0,35	0,4	13,6	1,70	0,40	0,5	14,5	1,77	0,43	0,6	17,8	2,14	0,54	0,9	25,1	2,81	0,61	1,1
035		13,4	1,47	0,37	0,4	15,2	1,58	0,43	0,5	16,9	1,69	0,49	0,6	18,0	1,75	0,54	0,7	22,5	2,10	0,68	1,1	31,8	2,74	0,77	1,4
045		19,3	1,64	0,53	0,5	21,5	1,75	0,60	0,7	23,6	1,85	0,69	0,9	24,9	1,91	0,74	1,0	30,8	2,25	0,93	1,5	43,4	2,92	1,05	1,8
055		22,7	1,71	0,62	0,5	25,8	1,79	0,72	0,7	28,7	1,88	0,84	0,9	30,5	1,95	0,91	1,1	38,0	2,29	1,15	1,6	53,3	2,98	1,29	2,0
075		28,4	1,47	0,78	0,6	32,3	1,58	0,91	0,7	36,0	1,70	1,05	1,0	38,3	1,77	1,14	1,1	48,0	2,14	1,45	1,8	67,9	2,82	1,65	2,2
105		44,3	1,67	1,21	0,9	49,8	1,74	1,40	1,2	54,9	1,82	1,60	1,6	58,3	1,89	1,74	1,8	72,5	2,24	2,19	2,9	102,3	2,94	2,48	3,6
022	65	9,6	1,38	0,26	0,3	10,8	1,48	0,30	0,4	11,9	1,57	0,35	0,6	12,6	1,63	0,37	0,6	15,3	1,96	0,46	1,0	21,2	2,54	0,52	1,2
030		10,9	1,41	0,30	0,3	12,4	1,50	0,35	0,4	13,8	1,60	0,40	0,5	14,6	1,65	0,43	0,6	17,7	1,96	0,54	0,9	24,8	2,55	0,	

Capacidades caloríficas

61AF 022-105		Temperatura del aire de entrada del intercambiador de calor de aire, bs (bh), °C																							
LWT	°C	-20 (-20,5)				-15 (-16)				-10 (-11)				-7 (-8)				2 (1)				7 (6)			
		Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp
		kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa
022	30	10,3	2,19	0,49	1,2	12,0	2,52	0,58	1,6	13,8	2,89	0,66	2,1	15,0	3,13	0,72	2,5	18,9	4,08	0,91	3,8	21,1	4,51	1,01	4,6
030		12,0	2,19	0,58	1,1	14,1	2,51	0,68	1,5	16,4	2,86	0,79	2,0	17,9	3,09	0,86	2,4	23,1	4,03	1,11	3,8	26,4	4,55	1,27	4,9
035		15,3	2,30	0,74	1,5	18,0	2,62	0,86	2,0	21,0	2,98	1,01	2,6	22,9	3,21	1,10	3,0	29,4	4,10	1,41	4,7	32,6	4,48	1,57	5,7
045		20,5	2,53	0,99	1,8	23,9	2,86	1,15	2,4	27,7	3,22	1,33	3,2	30,3	3,46	1,46	3,7	39,2	4,33	1,89	5,9	44,3	4,74	2,13	7,4
055		24,9	2,61	1,19	2,0	29,2	2,96	1,40	2,6	34,0	3,35	1,63	3,5	37,1	3,60	1,78	4,1	47,2	4,43	2,27	6,3	52,2	4,76	2,51	7,6
075		32,0	2,29	1,54	2,2	37,6	2,62	1,81	3,0	43,8	2,99	2,10	4,0	47,9	3,23	2,30	4,7	61,5	4,15	2,96	7,4	64,1	4,32	3,08	8,0
105		47,6	2,48	2,29	3,5	54,9	2,77	2,64	4,6	64,0	3,14	3,08	6,2	70,0	3,38	3,36	7,3	90,2	4,23	4,33	11,9	101,9	4,64	4,90	15,0
022	35	10,2	2,06	0,49	1,2	11,9	2,35	0,57	1,6	13,7	2,69	0,66	2,1	14,9	2,90	0,72	2,4	18,8	3,76	0,90	3,7	20,8	4,13	1,00	4,4
030		12,0	2,07	0,58	1,1	14,1	2,36	0,68	1,5	16,4	2,68	0,79	2,0	17,9	2,88	0,86	2,3	23,0	3,72	1,11	3,7	26,2	4,16	1,26	4,7
035		15,2	2,15	0,73	1,4	17,8	2,43	0,86	1,9	20,7	2,75	1,00	2,5	22,6	2,95	1,09	2,9	29,0	3,72	1,40	4,5	32,5	4,09	1,57	5,5
045		20,6	2,36	0,99	1,8	23,9	2,66	1,15	2,4	27,6	2,98	1,33	3,1	30,2	3,19	1,45	3,6	38,9	3,95	1,87	5,7	44,1	4,34	2,12	7,2
055		24,9	2,44	1,20	1,9	29,1	2,74	1,40	2,6	33,8	3,08	1,63	3,4	36,9	3,31	1,78	4,0	47,2	4,08	2,27	6,2	52,0	4,38	2,50	7,4
075		31,8	2,14	1,53	2,1	37,3	2,43	1,79	2,9	43,5	2,76	2,09	3,8	47,5	2,97	2,28	4,5	60,9	3,78	2,93	7,1	64,8	3,99	3,12	8,0
105		47,8	2,33	2,30	3,5	55,1	2,59	2,65	4,6	63,9	2,91	3,08	6,0	69,8	3,12	3,36	7,1	89,7	3,89	4,32	11,5	101,6	4,28	4,89	14,6
022	40	10,2	1,94	0,49	1,2	11,8	2,20	0,57	1,5	13,6	2,49	0,66	2,0	14,8	2,68	0,71	2,3	18,6	3,44	0,90	3,5	20,7	3,79	1,00	4,3
030		12,0	1,95	0,58	1,1	14,1	2,22	0,68	1,5	16,4	2,50	0,79	1,9	17,8	2,68	0,86	2,3	22,8	3,41	1,10	3,6	25,9	3,80	1,25	4,6
035		15,1	2,01	0,73	1,4	17,7	2,26	0,85	1,8	20,5	2,53	0,99	2,4	22,4	2,71	1,08	2,8	28,7	3,38	1,38	4,3	32,5	3,73	1,57	5,4
045		20,7	2,22	1,00	1,8	24,0	2,48	1,16	2,3	27,6	2,76	1,33	3,0	30,1	2,94	1,45	3,5	38,6	3,60	1,86	5,5	44,0	4,05	2,12	7,0
055		24,9	2,29	1,20	1,9	29,1	2,55	1,40	2,5	33,8	2,84	1,63	3,3	36,8	3,04	1,77	3,9	47,2	3,74	2,28	6,1	52,1	4,01	2,51	7,3
075		31,7	2,01	1,53	2,1	37,1	2,26	1,79	2,8	43,2	2,55	2,08	3,7	47,1	2,74	2,27	4,3	60,5	3,45	2,91	6,9	65,7	3,70	3,17	8,0
105		48,0	2,20	2,31	3,4	55,4	2,42	2,67	4,5	64,0	2,69	3,08	5,9	69,8	2,88	3,36	7,0	89,4	3,57	4,31	11,2	101,6	3,94	4,90	14,3
022	45	10,2	1,82	0,49	1,2	11,9	2,06	0,57	1,5	13,7	2,32	0,66	2,0	14,8	2,48	0,71	2,3	18,6	3,14	0,90	3,5	20,8	3,46	1,00	4,2
030		12,0	1,85	0,58	1,1	14,1	2,08	0,68	1,5	16,4	2,33	0,79	1,9	17,8	2,49	0,86	2,2	22,6	3,12	1,09	3,5	25,7	3,46	1,24	4,4
035		15,1	1,88	0,73	1,3	17,6	2,10	0,85	1,8	20,4	2,34	0,98	2,3	22,2	2,50	1,07	2,7	28,4	3,08	1,37	4,2	32,3	3,38	1,56	5,2
045		20,9	2,08	1,01	1,8	24,2	2,31	1,17	2,3	27,8	2,55	1,34	3,0	30,1	2,71	1,45	3,5	38,5	3,28	1,86	5,4	43,7	3,57	2,11	6,8
055		25,0	2,15	1,21	1,9	29,2	2,37	1,41	2,5	33,9	2,62	1,63	3,2	36,9	2,79	1,78	3,8	47,1	3,40	2,27	5,9	52,2	3,66	2,52	7,2
075		31,7	1,88	1,53	2,0	37,1	2,11	1,79	2,7	43,1	2,36	2,08	3,6	46,9	2,53	2,26	4,2	60,1	3,15	2,90	6,7	66,8	3,43	3,22	8,1
105		48,4	2,08	2,34	3,4	55,9	2,27	2,70	4,5	64,3	2,50	3,11	5,9	70,0	2,66	3,38	6,9	89,4	3,27	4,31	11,0	101,7	3,60	4,91	14,0
022	50	10,3	1,72	0,50	1,1	12,0	1,93	0,58	1,5	13,7	2,15	0,66	1,9	14,9	2,29	0,72	2,3	18,6	2,86	0,90	3,4	20,9	3,14	1,01	4,2
030		12,1	1,75	0,58	1,1	14,2	1,95	0,68	1,4	16,4	2,18	0,79	1,9	17,8	2,31	0,86	2,2	22,4	2,86	1,08	3,4	25,4	3,14	1,23	4,2
035		15,0	1,76	0,73	1,3	17,6	1,96	0,85	1,7	20,3	2,17	0,98	2,2	22,1	2,30	1,07	2,6	28,2	2,80	1,36	4,0	32,0	3,06	1,55	5,1
045		21,2	1,95	1,02	1,8	24,4	2,15	1,18	2,3	28,0	2,36	1,35	3,0	30,2	2,50	1,46	3,4	38,4	2,98	1,85	5,3	43,5	3,23	2,10	6,6
055		25,2	2,03	1,22	1,9	29,4	2,22	1,42	2,5	34,1	2,43	1,65	3,2	37,1	2,57	1,79	3,8	47,1	3,09	2,28	5,8	52,6	3,33	2,54	7,1
075		31,8	1,76	1,53	2,0	37,1	1,97	1,80	2,7	43,1	2,19	2,08	3,5	46,9	2,34	2,27	4,1	59,9	2,87	2,90	6,5	67,9	3,17	3,28	8,2
105		48,9	1,97	2,37	3,4	56,5	2,14	2,73	4,5	64,9	2,33	3,14	5,9	70,6	2,47	3,41	6,9	89,6	2,99	4,33	10,8	101,7	3,28	4,92	13,8
022	55	10,4	1,67	0,31	0,5	12,0	1,86	0,36	0,6	13,8	2,07	0,42	0,8	14,9	2,21	0,45	0,9	18,6	2,74	0,56	1,4	20,9	3,02	0,63	1,8
030		12,1	1,69	0,37	0,4	14,2	1,89	0,43	0,6	16,4	2,10	0,50	0,8	17,8	2,23	0,54	0,9	22,4	2,74	0,68	1,4	25,3	3,02	0,76	1,7
035		15,1	1,70	0,46	0,6	17,6	1,89	0,53	0,7	20,3	2,09	0,61	1,0	22,1	2,22	0,67	1,1	28,1	2,69	0,85	1,7	31,9	2,95	0,97	2,1
045		21,4	1,89	0,65	0,8	24,6	2,08	0,74	1,0	28,1	2,29	0,85	1,3	30,4	2,41	0,92	1,5	38,3	2,88	1,16	2,2	43,5	3,14	1,31	2,8
055		25,3	1,96	0,77	0,8	29,6	2,13	0,90	1,0	34,2	2,33	1,04	1,4	37,2	2,46	1,13	1,6	47,2	2,95	1,43	2,4	52,8	3,20	1,60	3,0
075		31,9	1,70	0,96	0,8	37,2	1,89	1,13	1,1	43,1	2,10	1,31	1,5	47,0	2,24	1,42	1,7	59,9	2,74	1,81	2,7	67,9	3,03	2,06	3,4
105		49,3	1,92	1,49	1,4	57,0	2,07	1,72	1,9	65,3	2,25	1,98	2,4	71,0	2,38	2,15	2,8	89,8	2,87	2,72	4,4	101,9	3,16	3,08	5,6
022	60	10,5	1,60	0,25	0,3	12,2	1,77	0,30	0,4	14,0	1,97	0,34	0,6	15,1	2,09	0,37	0,6	18,8	2,56	0,45	0,9	21,0	2,81	0,51	1,2
030		12,2	1,63	0,30	0,3	14,2	1,80	0,35	0,4	16,4	1,99	0,40	0,5	17,8	2,11	0,43	0,6	22,2	2,56	0,54	0,9	25,1	2,81	0,61	1,1
035		15,1	1,62	0,37	0,4	17,6	1,79	0,43	0,5	20,3	1,97	0,49	0,6	22,1	2,09	0,54	0,7	28,0	2,51	0,68	1,1	31,8	2,74	0,77	1,4
045		21,7	1,81	0,53	0,5	24,9	1,98	0,60	0,7	28,4	2,16	0,69	0,9	30,6	2,28	0,74	1,0	38,4	2,69	0,93	1,5	43,4	2,92	1,05	1,8
055		25,5	1,88	0,62	0,5	29,9	2,03	0,72	0,7	34,6	2,20	0,84	0,9	37,5	2,32	0,91	1,1	47,4	2,75	1,15	1,6	53,3	2,98	1,29	2,0
075		32,1	1,62	0,78	0,6	37,4	1,80	0,91	0,7	43,3	1,99	1,05	1,0	47,1	2,11	1,14	1,1	59,9	2,56	1,45	1,8	67,9	2,82	1,65	2,2
105		49,9	1,85	1,21	0,9	57,7	1,98	1,40	1,2	66,0	2,14	1,60	1,6	71,7	2,25	1,74	1,8	90,4	2,68	2,19	2,9	102,3	2,95	2,48	3,6
022	65	10,8	1,52	0,26	0,3	12,5	1,67	0,30	0,4	14,3	1,84	0,35	0,6	15,4	1,94	0,37	0,6	19,0	2,34	0,46	1,0	21,2	2,55	0,52	1,2
030		12,3	1,55	0,30	0,3	14,4	1,70	0,35	0,4	16,5	1,87	0,40	0,												

Capacidades caloríficas según EN14511-3:2011

61AF 022-105		Temperatura del aire de entrada del intercambiador de calor de aire, bs (bh), °C																							
LWT °C	30	12 (11)				15 (14)				20 (19)				25 (24)				30 (29)				35 (34)			
		Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa	Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa	Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa	Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa	Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa	Qh kW	COP kW/kW	q l/s	Δp kPa
022	30	23,2	4,87	1,11	5,5	23,3	4,90	1,12	5,6	23,5	4,94	1,12	5,6	23,6	4,99	1,13	5,7	23,7	5,03	1,14	5,7	23,9	5,10	1,10	5,8
030	30	29,9	5,03	1,44	6,2	32,0	5,33	1,53	7,0	35,1	5,75	1,68	8,3	37,1	6,03	1,78	9,2	38,2	6,19	1,83	9,7	39,3	6,30	1,90	10,2
035	30	35,4	4,77	1,70	6,6	37,2	4,98	1,79	7,2	40,4	5,34	1,94	8,3	43,4	5,68	2,08	9,4	44,8	5,85	2,15	10,0	46,3	6,00	2,20	10,6
045	30	49,2	5,08	2,36	8,9	52,3	5,30	2,50	9,9	55,7	5,55	2,67	11,1	57,4	5,67	2,75	11,7	59,1	5,79	2,83	12,4	60,8	5,90	2,90	13,0
055	30	57,7	5,04	2,77	9,1	60,8	5,21	2,92	10,0	64,1	5,38	3,07	11,0	67,2	5,52	3,22	12,0	69,1	5,61	3,31	12,6	71,0	5,70	3,40	13,3
075	30	67,8	4,51	3,25	8,9	69,9	4,64	3,35	9,4	73,5	4,86	3,52	10,3	77,1	5,09	3,70	11,2	80,8	5,31	3,87	12,3	84,5	5,50	4,00	13,3
105	30	113,9	4,94	5,46	18,4	121,3	5,13	5,81	20,8	123,7	5,20	5,93	21,6	126,0	5,26	6,04	22,3	128,3	5,32	6,15	23,1	130,7	5,40	6,30	23,9
022	35	23,5	4,55	1,13	5,5	23,7	4,59	1,14	5,6	23,8	4,64	1,14	5,6	23,9	4,68	1,15	5,7	24,1	4,71	1,16	5,8	24,2	4,80	1,20	5,8
030	35	29,6	4,59	1,42	5,9	31,6	4,85	1,52	6,7	34,8	5,25	1,67	8,0	37,4	5,56	1,79	9,1	38,5	5,70	1,85	9,6	39,6	5,80	1,90	10,1
035	35	35,3	4,34	1,70	6,4	37,0	4,52	1,78	7,0	40,1	4,83	1,93	8,0	43,4	5,14	2,08	9,2	45,2	5,31	2,17	9,9	46,6	5,46	2,24	10,5
045	35	48,8	4,61	2,34	8,6	51,8	4,81	2,49	9,5	56,3	5,09	2,70	11,1	58,0	5,19	2,78	11,7	59,7	5,30	2,86	12,3	61,4	5,40	2,95	12,9
055	35	57,2	4,64	2,75	8,8	60,6	4,81	2,91	9,7	64,2	4,99	3,08	10,8	67,5	5,14	3,24	11,9	69,6	5,23	3,34	12,5	71,4	5,31	3,43	13,1
075	35	68,2	4,15	3,28	8,8	70,3	4,26	3,38	9,3	73,9	4,46	3,55	10,2	77,5	4,66	3,72	11,1	81,2	4,86	3,90	12,1	84,9	5,06	4,08	13,1
105	35	112,9	4,56	5,41	17,7	120,1	4,75	5,76	19,9	124,9	4,87	5,99	21,5	127,2	4,94	6,10	22,2	129,5	4,99	6,21	23,0	131,8	5,05	6,32	23,8
022	40	23,2	4,14	1,12	5,3	24,1	4,28	1,16	5,6	24,2	4,31	1,17	5,7	24,4	4,35	1,17	5,8	24,5	4,38	1,18	5,8	24,6	4,42	1,19	5,9
030	40	29,3	4,18	1,41	5,7	31,2	4,40	1,50	6,4	34,5	4,77	1,66	7,7	37,5	5,09	1,80	9,0	38,8	5,23	1,86	9,5	39,9	5,35	1,92	10,1
035	40	35,3	3,96	1,70	6,2	37,0	4,10	1,78	6,8	40,0	4,36	1,92	7,8	43,2	4,62	2,07	8,9	45,6	4,82	2,19	9,9	47,1	4,94	2,26	10,5
045	40	48,6	4,20	2,34	8,3	51,5	4,35	2,48	9,2	56,5	4,62	2,71	10,9	58,6	4,73	2,82	11,7	60,4	4,82	2,90	12,3	62,1	4,91	2,98	12,9
055	40	57,2	4,26	2,75	8,6	60,4	4,41	2,90	9,5	64,5	4,59	3,10	10,7	67,8	4,74	3,26	11,7	70,3	4,84	3,38	12,5	72,1	4,92	3,47	13,1
075	40	68,9	3,83	3,31	8,7	71,0	3,93	3,41	9,2	74,5	4,09	3,58	10,1	78,1	4,26	3,75	11,0	81,7	4,44	3,93	12,0	85,5	4,62	4,11	13,0
105	40	112,6	4,20	5,41	17,3	119,3	4,37	5,73	19,3	126,5	4,54	6,08	21,5	128,8	4,60	6,19	22,3	131,1	4,65	6,30	23,0	133,4	4,71	6,41	23,8
022	45	23,0	3,75	1,11	5,1	24,5	3,95	1,18	5,7	24,8	3,99	1,19	5,8	24,9	4,02	1,20	5,9	25,0	4,05	1,21	5,9	25,2	4,08	1,21	6,0
030	45	29,0	3,80	1,40	5,5	30,9	3,99	1,49	6,2	34,1	4,30	1,64	7,4	37,1	4,59	1,78	8,6	39,1	4,77	1,88	9,5	40,2	4,88	1,93	10,0
035	45	35,4	3,60	1,70	6,1	37,0	3,72	1,78	6,7	40,0	3,93	1,93	7,7	43,1	4,15	2,07	8,7	46,2	4,36	2,22	9,9	47,6	4,46	2,29	10,5
045	45	48,6	3,80	2,34	8,2	51,4	3,94	2,47	9,0	56,2	4,15	2,71	10,6	59,5	4,29	2,86	11,8	61,2	4,37	2,95	12,4	63,0	4,44	3,03	13,0
055	45	57,4	3,88	2,76	8,5	60,5	4,02	2,91	9,3	65,1	4,21	3,14	10,7	68,3	4,34	3,29	11,6	71,2	4,44	3,43	12,5	73,0	4,51	3,52	13,1
075	45	69,7	3,53	3,36	8,7	71,8	3,61	3,46	9,2	75,3	3,76	3,63	10,1	78,9	3,91	3,80	11,0	82,5	4,06	3,97	12,0	86,2	4,21	4,15	13,0
105	45	112,8	3,85	5,43	17,0	119,4	4,01	5,75	18,9	128,4	4,21	6,18	21,7	130,7	4,26	6,29	22,5	133,0	4,31	6,40	23,2	135,3	4,36	6,51	24,0
022	50	22,9	3,38	1,11	5,0	24,5	3,56	1,18	5,6	25,4	3,67	1,23	6,0	25,6	3,69	1,23	6,1	25,7	3,72	1,24	6,1	25,9	3,75	1,25	6,2
030	50	28,6	3,43	1,38	5,2	30,6	3,61	1,48	5,9	33,7	3,87	1,62	7,1	36,6	4,11	1,76	8,2	38,8	4,29	1,87	9,2	38,9	4,30	1,87	9,2
035	50	35,5	3,27	1,71	6,1	37,2	3,37	1,79	6,6	40,1	3,55	1,93	7,5	43,2	3,73	2,08	8,6	46,3	3,90	2,23	9,8	48,4	4,01	2,33	10,6
045	50	48,7	3,44	2,35	8,0	51,4	3,55	2,48	8,9	56,2	3,73	2,71	10,4	60,7	3,88	2,93	12,0	62,4	3,94	3,01	12,6	64,2	3,99	3,10	13,2
055	50	57,7	3,53	2,78	8,4	60,8	3,65	2,93	9,2	66,0	3,84	3,18	10,7	69,2	3,95	3,34	11,7	72,4	4,06	3,49	12,7	74,3	4,12	3,58	13,3
075	50	70,7	3,25	3,41	8,8	72,8	3,33	3,51	9,3	76,4	3,46	3,68	10,2	80,0	3,59	3,86	11,1	83,6	3,7	4,0	12,0	87,3	3,84	4,21	13,0
105	50	113,3	3,52	5,46	16,8	119,9	3,67	5,78	18,7	130,9	3,89	6,31	22,1	133,2	3,94	6,42	22,9	135,5	4,0	6,5	23,6	137,8	4,03	6,64	24,4
022	55	22,9	3,26	0,69	2,1	24,5	3,44	0,74	2,3	25,7	3,58	0,78	2,6	25,8	3,61	0,78	2,6	25,9	3,6	0,8	2,6	26,1	3,66	0,79	2,6
030	55	28,4	3,31	0,86	2,1	30,4	3,50	0,92	2,4	33,5	3,77	1,01	2,9	36,4	4,03	1,10	3,4	38,5	4,2	1,2	3,8	38,6	4,23	1,17	3,8
035	55	35,5	3,18	1,07	2,6	37,2	3,29	1,12	2,8	40,1	3,47	1,21	3,2	43,1	3,66	1,30	3,7	46,3	3,9	1,4	4,2	48,4	3,98	1,46	4,5
045	55	48,7	3,37	1,47	3,4	51,4	3,49	1,55	3,8	56,1	3,69	1,70	4,4	60,7	3,87	1,83	5,1	62,4	3,9	1,9	5,3	64,1	4,00	1,94	5,6
055	55	57,8	3,40	1,75	3,5	60,9	3,53	1,84	3,9	66,2	3,73	2,00	4,5	69,4	3,85	2,10	4,9	72,6	4,0	2,2	5,4	74,6	4,03	2,25	5,6
075	55	71,1	3,14	2,15	3,7	73,2	3,21	2,21	3,9	76,8	3,34	2,32	4,3	80,4	3,47	2,43	4,6	84,0	3,6	2,5	5,0	87,6	3,72	2,65	5,4
105	55	113,5	3,42	3,43	6,8	120,0	3,56	3,62	7,6	131,3	3,81	3,97	9,0	133,8	3,86	4,04	9,4	136,0	3,9	4,1	9,7	138,3	3,96	4,18	10,0
022	60	23,1	3,03	0,56	1,4	24,5	3,18	0,59	1,5	26,3	3,37	0,64	1,7	26,4	3,39	0,64	1,8	26,5	3,4	0,6	1,8	26,7	3,43	0,65	1,8
030	60	28,1	3,07	0,68	1,4	30,1	3,24	0,73	1,6	33,2	3,49	0,80	1,9	36,2	3,74	0,88	2,2	37,7	3,9	0,9	2,4	37,8	3,89	0,92	2,4
035	60	35,7	2,98	0,87	1,7	37,4	3,07	0,91	1,9	40,2	3,24	0,97	2,1	43,3	3,41	1,05	2,4	46,4	3,6	1,1	2,8	49,0	3,71	1,19	3,0
045	60	48,8	3,14	1,18	2,3	51,5	3,25	1,25	2,5	56,2	3,43	1,36	2,9	61,1	3,61	1,48	3,4	63,3	3,7	1,5	3,6	65,0	3,74	1,57	3,8
055	60	58,3	3,17	1,41	2,4	61,3	3,28	1,49	2,6	66,6	3,47	1,61	3,0	70,3	3,59	1,70	3,3	73,5	3,7	1,8	3,6	75,8	3,77	1,83	3,8
075	60	72,3	2,96	1,75	2,5	74,2	3,02	1,80	2,6	77,8	3,14	1,88	2,8	81,4	3,25	1,97	3,1	85,0	3,4	2,1	3,4	88,6	3,49	2,15	3,6
105	60	114,1	3,20	2,76	4,5	120,6	3,34	2,92	5,0	131,8	3,57	3,19	5,9	135,8	3,65	3,29	6,2	138,1	3,7	3,3	6,4	140,3	3,74	3,40	6,6
022	65	23,4	2,74	0,57	1,4	24,6	2,85	0,60	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
030	65	27,7	2,77	0,67</																					

Capacidades caloríficas

61AF 022-105		Temperatura del aire de entrada del intercambiador de calor de aire, bs (bh), °C																										
LWT °C	Qh kW	12 (11)				15 (14)				20 (19)				25 (24)				30 (29)				35 (34)						
		COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp	Qh	COP	q	Δp				
		kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa	kW	kW/kW	l/s	kPa
022 30	23,2	4,91	1,11	5,5	23,3	4,94	1,12	5,6	23,4	4,98	1,12	5,6	23,5	5,03	1,13	5,7	23,7	5,08	1,14	5,7	23,8	5,1	1,1	5,8	23,8	5,1	1,1	5,8
030	29,9	5,07	1,44	6,2	31,9	5,38	1,53	7,0	35,0	5,82	1,68	8,3	37,0	6,11	1,78	9,2	38,1	6,27	1,83	9,7	39,2	6,4	1,9	10,2	46,2	6,1	2,2	10,6
035	35,4	4,81	1,70	6,6	37,2	5,03	1,79	7,2	40,3	5,39	1,94	8,3	43,3	5,75	2,08	9,4	44,7	5,92	2,15	10,0	46,2	6,1	2,2	10,6	46,2	6,1	2,2	10,6
045	49,1	5,12	2,36	8,9	52,1	5,35	2,50	9,9	55,6	5,61	2,67	11,1	57,3	5,74	2,75	11,7	59,0	5,86	2,83	12,4	60,7	6,0	2,9	13,0	60,7	6,0	2,9	13,0
055	57,6	5,09	2,77	9,1	60,7	5,26	2,92	10,0	63,9	5,43	3,07	11,0	67,1	5,59	3,22	12,0	68,9	5,67	3,31	12,6	70,8	5,8	3,4	13,3	70,8	5,8	3,4	13,3
075	67,6	4,54	3,25	8,9	69,8	4,68	3,35	9,4	73,3	4,90	3,52	10,3	77,0	5,13	3,70	11,2	80,6	5,37	3,87	12,3	84,3	5,6	4,0	13,3	84,3	5,6	4,0	13,3
105	113,6	4,99	5,46	18,4	121,0	5,20	5,81	20,8	123,3	5,27	5,93	21,6	125,6	5,33	6,04	22,3	127,9	5,40	6,15	23,1	130,2	5,5	6,3	23,9	130,2	5,5	6,3	23,9
022 35	23,4	4,59	1,13	5,5	23,6	4,63	1,14	5,6	23,8	4,67	1,14	5,6	23,9	4,71	1,15	5,7	24,0	4,75	1,16	5,8	24,2	4,8	1,2	5,8	24,2	4,8	1,2	5,8
030	29,6	4,62	1,42	5,9	31,6	4,89	1,52	6,7	34,7	5,30	1,67	8,0	37,3	5,63	1,79	9,1	38,4	5,77	1,85	9,6	39,5	5,9	1,9	10,1	39,5	5,9	1,9	10,1
035	35,2	4,37	1,70	6,4	37,0	4,55	1,78	7,0	40,1	4,87	1,93	8,0	43,3	5,19	2,08	9,2	45,1	5,37	2,17	9,9	46,5	5,52	2,24	10,5	46,5	5,52	2,24	10,5
045	48,7	4,65	2,34	8,6	51,7	4,85	2,49	9,5	56,1	5,14	2,70	11,1	57,8	5,25	2,78	11,7	59,5	5,36	2,86	12,3	61,2	5,46	2,95	12,9	61,2	5,46	2,95	12,9
055	57,1	4,67	2,75	8,8	60,5	4,85	2,91	9,7	64,1	5,04	3,08	10,8	67,3	5,19	3,24	11,9	69,4	5,29	3,34	12,5	71,3	5,37	3,43	13,1	71,3	5,37	3,43	13,1
075	68,1	4,18	3,28	8,8	70,2	4,29	3,38	9,3	73,7	4,49	3,55	10,2	77,4	4,70	3,72	11,1	81,0	4,90	3,90	12,1	84,1	5,11	4,08	13,1	84,1	5,11	4,08	13,1
105	112,5	4,60	5,41	17,7	119,8	4,80	5,76	19,9	124,5	4,93	5,99	21,5	126,8	5,00	6,10	22,2	129,1	5,06	6,21	23,0	131,4	5,12	6,32	23,8	131,4	5,12	6,32	23,8
022 40	23,2	4,17	1,12	5,3	24,0	4,31	1,16	5,6	24,2	4,34	1,17	5,7	24,3	4,38	1,17	5,8	24,5	4,42	1,18	5,8	24,6	4,45	1,19	5,9	24,6	4,45	1,19	5,9
030	29,3	4,21	1,41	5,7	31,2	4,43	1,50	6,4	34,4	4,81	1,66	7,7	37,4	5,15	1,80	9,0	38,7	5,29	1,86	9,5	39,8	5,41	1,92	10,1	39,8	5,41	1,92	10,1
035	35,2	3,98	1,70	6,2	36,9	4,13	1,78	6,8	39,9	4,39	1,92	7,8	43,1	4,66	2,07	8,9	45,5	4,87	2,19	9,9	47,0	4,99	2,26	10,5	47,0	4,99	2,26	10,5
045	48,5	4,22	2,34	8,3	51,4	4,39	2,48	9,2	56,3	4,66	2,71	10,9	58,5	4,78	2,82	11,7	60,2	4,87	2,90	12,3	61,9	4,96	2,98	12,9	61,9	4,96	2,98	12,9
055	57,1	4,28	2,75	8,6	60,2	4,44	2,90	9,5	64,3	4,63	3,10	10,7	67,6	4,78	3,26	11,7	70,1	4,89	3,38	12,5	71,9	4,97	3,47	13,1	71,9	4,97	3,47	13,1
075	68,7	3,85	3,31	8,7	70,8	3,95	3,41	9,2	74,3	4,12	3,58	10,1	77,9	4,30	3,75	11,0	81,6	4,48	3,93	12,0	85,3	4,66	4,11	13,0	85,3	4,66	4,11	13,0
105	112,3	4,24	5,41	17,3	119,0	4,41	5,73	19,3	126,1	4,59	6,08	21,5	128,4	4,65	6,19	22,3	130,7	4,71	6,30	23,0	132,9	4,77	6,41	23,8	132,9	4,77	6,41	23,8
022 45	23,0	3,77	1,11	5,1	24,5	3,97	1,18	5,7	24,7	4,02	1,19	5,8	24,9	4,05	1,20	5,9	25,0	4,08	1,21	5,9	25,1	4,11	1,21	6,0	25,1	4,11	1,21	6,0
030	29,0	3,82	1,40	5,5	30,8	4,01	1,49	6,2	34,0	4,34	1,64	7,4	37,0	4,63	1,78	8,6	39,0	4,82	1,88	9,5	40,1	4,93	1,93	10,0	40,1	4,93	1,93	10,0
035	35,3	3,62	1,70	6,1	37,0	3,74	1,78	6,7	39,9	3,96	1,93	7,7	43,0	4,18	2,07	8,7	46,0	4,39	2,22	9,9	47,5	4,50	2,29	10,5	47,5	4,50	2,29	10,5
045	48,5	3,83	2,34	8,2	51,3	3,96	2,47	9,0	56,1	4,19	2,71	10,6	59,4	4,33	2,86	11,8	61,1	4,40	2,95	12,4	62,8	4,48	3,03	13,0	62,8	4,48	3,03	13,0
055	57,3	3,91	2,76	8,5	60,4	4,05	2,91	9,3	65,0	4,24	3,14	10,7	68,1	4,37	3,29	11,6	71,0	4,48	3,43	12,5	72,9	4,55	3,52	13,1	72,9	4,55	3,52	13,1
075	69,5	3,54	3,36	8,7	71,6	3,63	3,46	9,2	75,2	3,78	3,63	10,1	78,7	3,94	3,80	11,0	82,3	4,09	3,97	12,0	86,0	4,24	4,15	13,0	86,0	4,24	4,15	13,0
105	112,5	3,88	5,43	17,0	119,1	4,04	5,75	18,9	128,0	4,25	6,18	21,7	130,3	4,31	6,29	22,5	132,6	4,36	6,40	23,2	134,9	4,41	6,51	24,0	134,9	4,41	6,51	24,0
022 50	22,9	3,39	1,11	5,0	24,5	3,58	1,18	5,6	25,4	3,69	1,23	6,0	25,5	3,72	1,23	6,1	25,7	3,74	1,24	6,1	25,8	3,77	1,25	6,2	25,8	3,77	1,25	6,2
030	28,6	3,45	1,38	5,2	30,5	3,63	1,48	5,9	33,6	3,90	1,62	7,1	36,5	4,14	1,76	8,2	38,7	4,33	1,87	9,2	38,8	4,34	1,87	9,2	38,8	4,34	1,87	9,2
035	35,5	3,28	1,71	6,1	37,1	3,39	1,79	6,6	40,0	3,57	1,93	7,5	43,1	3,75	2,08	8,6	46,2	3,93	2,23	9,8	48,2	4,04	2,33	10,6	48,2	4,04	2,33	10,6
045	48,6	3,45	2,35	8,0	51,3	3,57	2,48	8,9	56,1	3,75	2,71	10,4	60,5	3,91	2,93	12,0	62,3	3,97	3,01	12,6	64,0	4,02	3,10	13,2	64,0	4,02	3,10	13,2
055	57,6	3,55	2,78	8,4	60,7	3,67	2,93	9,2	65,8	3,87	3,18	10,7	69,0	3,98	3,34	11,7	72,2	4,09	3,49	12,7	74,1	4,15	3,58	13,3	74,1	4,15	3,58	13,3
075	70,5	3,26	3,41	8,8	72,6	3,34	3,51	9,3	76,2	3,47	3,68	10,2	79,8	3,61	3,86	11,1	83,4	3,7	4,0	12,0	87,0	3,87	4,21	13,0	87,0	3,87	4,21	13,0
105	113,0	3,55	5,46	16,8	119,6	3,69	5,78	18,7	130,5	3,93	6,31	22,1	132,8	3,98	6,42	22,9	135,0	4,0	6,5	23,6	137,3	4,07	6,64	24,4	137,3	4,07	6,64	24,4
022 55	22,9	3,27	0,69	2,1	24,5	3,45	0,74	2,3	25,6	3,59	0,78	2,6	25,8	3,61	0,78	2,6	25,9	3,6	0,8	2,6	26,1	3,67	0,79	2,6	26,1	3,67	0,79	2,6
030	28,4	3,32	0,86	2,1	30,4	3,51	0,92	2,4	33,5	3,78	1,01	2,9	36,4	4,04	1,10	3,4	38,5	4,2	1,2	3,8	38,5	4,24	1,17	3,8	38,5	4,24	1,17	3,8
035	35,5	3,19	1,07	2,6	37,2	3,30	1,12	2,8	40,0	3,48	1,21	3,2	43,1	3,67	1,30	3,7	46,2	3,9	1,4	4,2	48,3	3,99	1,46	4,5	48,3	3,99	1,46	4,5
045	48,6	3,38	1,47	3,4	51,3	3,50	1,55	3,8	56,1	3,70	1,70	4,4	60,6	3,88	1,83	5,1	62,3	3,9	1,9	5,3	64,1	4,01	1,94	5,6	64,1	4,01	1,94	5,6
055	57,8	3,41	1,75	3,5	60,9	3,54	1,84	3,9	66,2	3,74	2,00	4,5	69,4	3,86	2,10	4,9	72,6	4,0	2,2	5,4	74,5	4,04	2,25	5,6	74,5	4,04	2,25	5,6
075	71,1	3,14	2,15	3,7	73,2	3,22	2,21	3,9	76,7	3,34	2,32	4,3	80,3	3,47	2,43	4,6	83,9	3,6	2,5	5,0	87,6	3,75	2,65	5,4	87,6	3,75	2,65	5,4
105	113,3	3,42	3,43	6,8	119,8	3,57	3,62	7,6	131,1	3,82	3,97	9,0	133,6	3,88	4,04	9,4	135,9	3,9	4,1	9,7	138,1	3,97	4,18	10,0	138,1	3,97	4,18	10,0
022 60	23,1	3,03	0,56	1,4	24,5	3,18	0,59	1,5	26,2	3,37	0,64	1,7	26,4	3,39	0,64	1,8	26,5	3,4	0,6	1,8	26,7	3,44	0,65	1,8	26,7	3,44	0,65	1,8
030	28,1	3,08	0,68	1,4	30,1	3,24	0,73	1,6	33,2	3,50	0,80	1,9	36,2	3,74	0,88	2,2	37,7	3,9	0,9	2,4	37,8	3,90	0,92	2,4	37,8	3,90	0,92	2,4

B.3. Propiedades y programaciones definidas en DesigBuilder para las Bombas de Calor.

B.3.1. Definiciones para la Bomba de Calor de Calefacción

Con base en una serie de capturas de la interface gráfica del software DesignBuilder, se describen los parámetros definidos/seleccionados para la Bomba de Calor dedicada al circuito de agua caliente para calefacción.

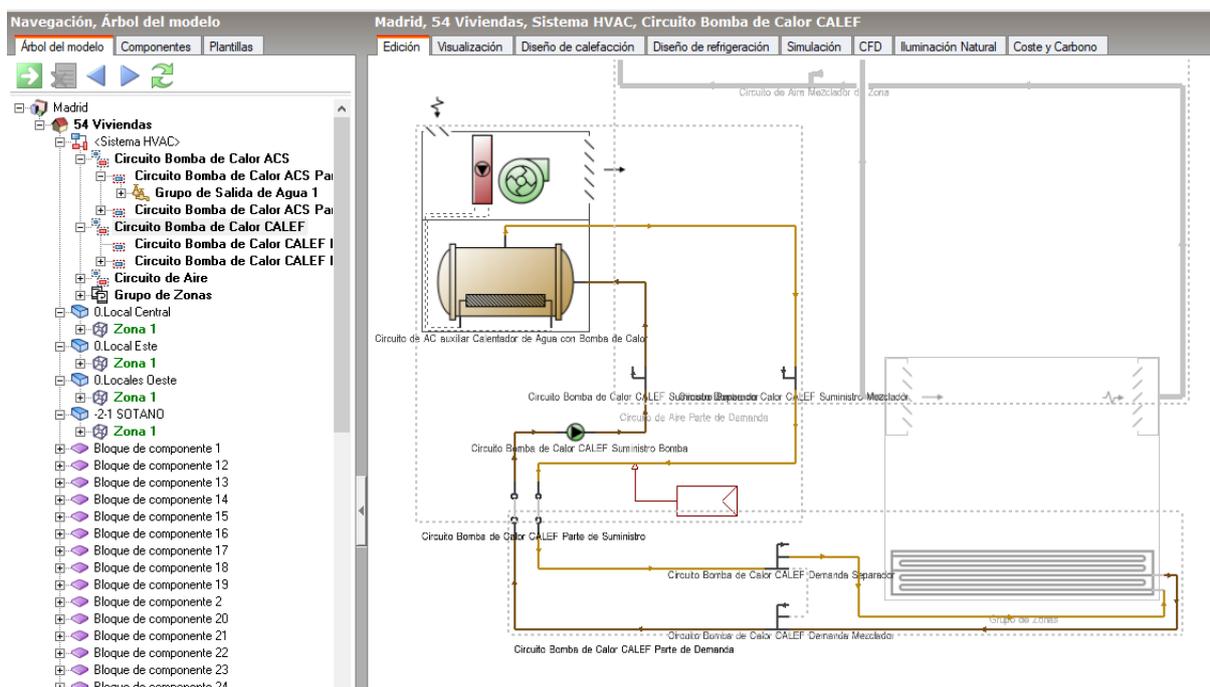


Figura B.1. Árbol de modelo y esquema del componente Circuito Bomba de Calor de Calefacción

Calentador de agua con bomba de calor	
General	
Nombre	Circuito de AC auxiliar Calentador de Agua con B
Programación de disponibilidad	On 24/7
Parámetros del Compresor	
Programación de consigna de temperatura del compresor	0.Carlos LowT heat pump water supply temperatu
Diferencia de temperatura de banda muerta (°C)	5,00
Temperatura mínima del aire de entrada para el funcionamiento del...	-4,90
Ubicación del compresor	3-Exterior
Parámetros del Caudal	
Caudal de agua del condensador (m³/s)	Autocalculate
Caudal de aire del evaporador (m³/s)	Autocalculate
Parámetros del Aire de Entrada	
Configuración del aire de entrada	3-Solo aire exterior
Parámetros del Ventilador	
Ubicación del ventilador	2-Después de baterías (succión)
Parámetros de Consumo Auxiliar	
Consumo eléctrico auxiliar en ciclo (W)	0,00
Consumo eléctrico auxiliar fuera de ciclo (W)	0,00
Ubicación de la disipación de calor	2-Exterior

Figura B.2. Propiedades globales de la Bomba de Calor

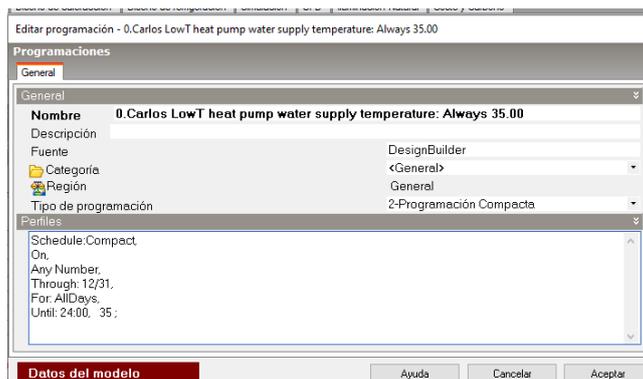


Figura B.3. Detalles de la programación empleada por el compresor. Siempre 35 °C.

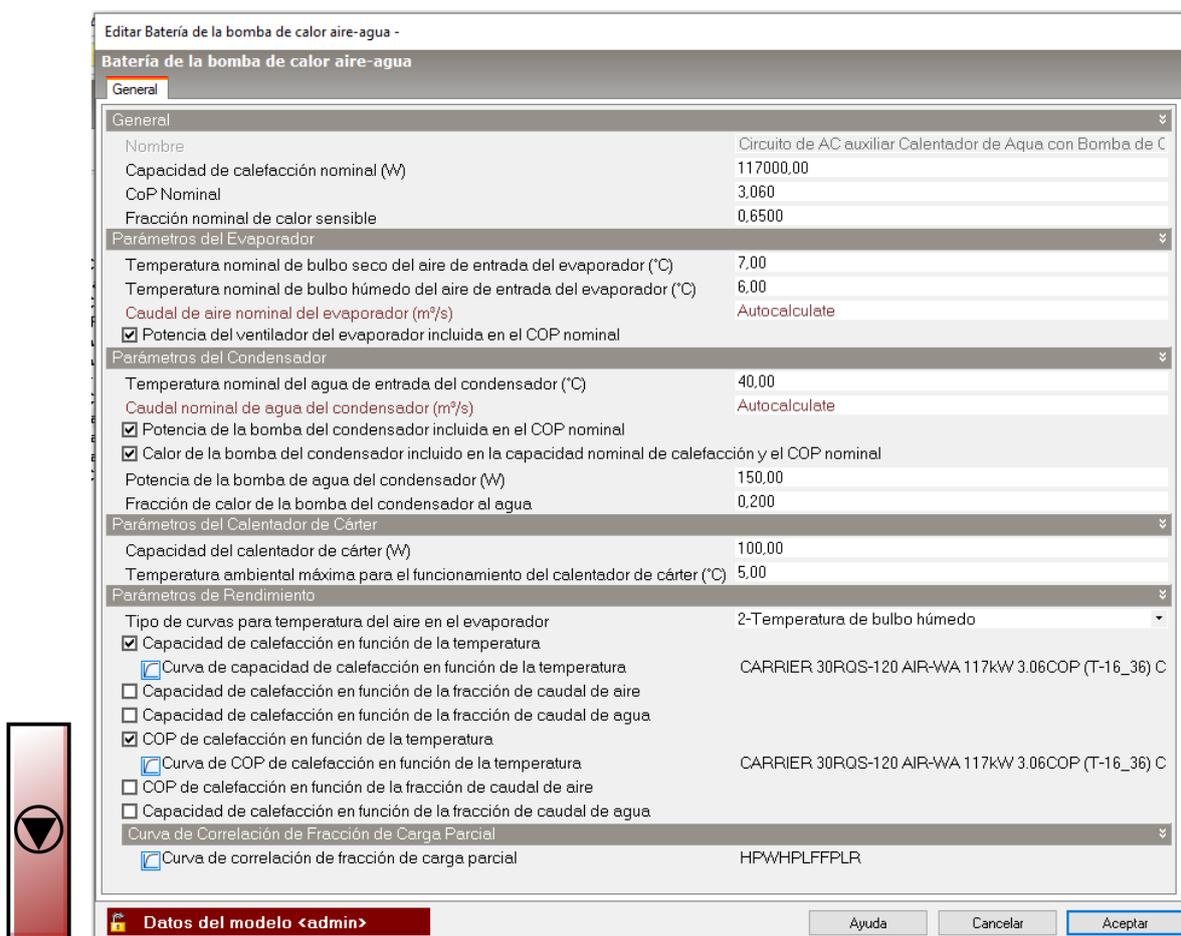
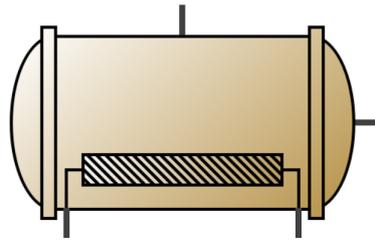


Figura B.4. Parámetros Nominales y de rendimiento del circuito del refrigerante, exceptuando la compresión.



Editar Calentador de agua -

Calentador de agua

Calentador de agua | Dimensionado

General	
Nombre	Circuito de AC auxiliar Calentador de Agua con Bomba de
Tipo	1-Mixto
Volumen del tanque (m ³)	0,0380
Conexión de Planta de Calor Externa	
<input checked="" type="checkbox"/> Conexión de planta de calor externa	
Tiempo de recuperación indirecta de calentamiento de agua (hr)	1,50
Configuración de Temperaturas	
Programación de consigna de temperatura	Heating low control temperature schedule: Always 15.00
Diferencia de temperatura de banda muerta (°C)	5,00
Límite de temperatura máxima (°C)	90,00
Configuración de Transferencia de Calor al Ambiente	
Indicador de temperatura de ambiente	1-Programación
Programación de temperatura de ambiente	Water heater ambient temperature schedule: Always 20.00
Coeficientes de Pérdida de Calor	
Coeficiente de pérdida a temperatura ambiente en ciclo (W/K)	6,00
Coeficiente de pérdida a temperatura ambiente fuera de ciclo	0,00
Elemento de Calentamiento Interno	
<input type="checkbox"/> Elemento de calentamiento interno	
Parámetros de uso	
Rendimiento a la salida	1,000
Caudal nominal - Salida (m ³ /s)	Autosize
Configuración de la Fuente	
Rendimiento a la entrada	1,000
Caudal nominal - Entrada (m ³ /s)	Autosize
Modo de control del flujo de la fuente	1-Consigna primaria de calefacción indirecta

Datos del modelo <admin> Ayuda Cancelar Aceptar

Figura B.5. Parámetros del tanque acumulador.

Aunque no se considera acumulación para este circuito (Figura B.5) es necesario definir un volumen mínimo. La temperatura del tanque debe ser siempre inferior a la de salida del compresor, o si no interviene el elemento de calentamiento interno a pesar de que no esté activado, generando un consumo eléctrico de efecto Joule que es absolutamente ficticio.

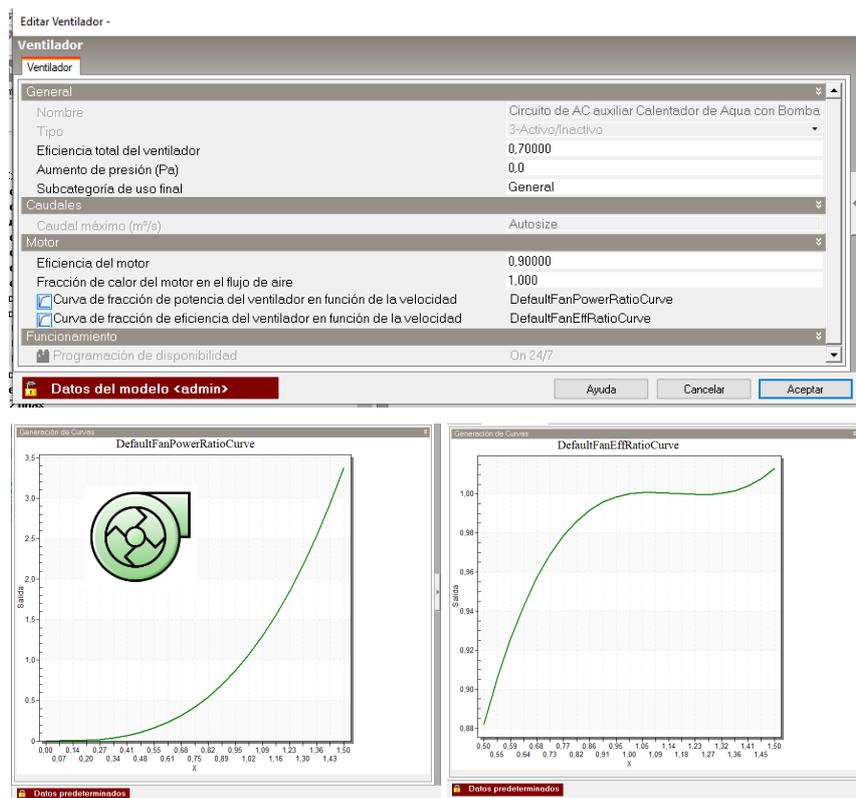


Figura B.6. Parámetros del ventilador en evaporador.

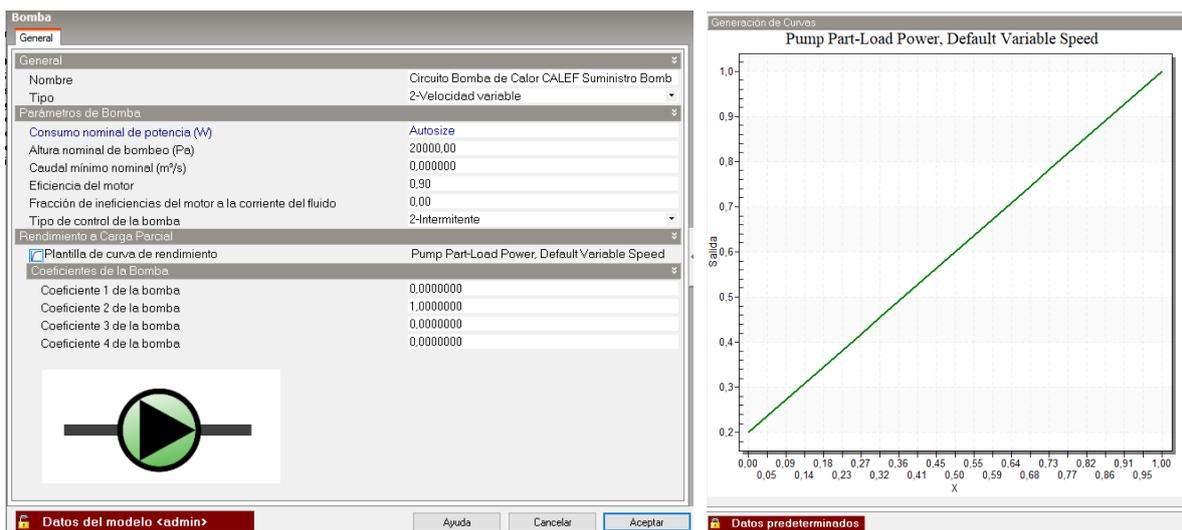


Figura B.7. Bomba impulsora del circuito de agua caliente.

B.3.2. Generación de las Curvas de Rendimiento Energyplus para Carrier 30RQS

Como es sabido, EnergyPlus es el motor de cálculo del programa de simulación DesignBuilder. Para alimentar este motor de cálculo con datos de rendimiento de las Bombas de Calor, tanto de COP como de Capacidad Calorífica, es necesario adaptar los valores de tablas del catálogo a curvas que puedan ser leídas por EnergyPlus. Esta adaptación se realiza mediante aproximaciones polinomiales.

DesignBuilder cuenta con una “herramienta de generación de curvas” cuya apariencia puede apreciarse en la Figura B.8. En este caso es empleada para ingresar datos de rendimiento de las bombas, pero su aplicabilidad es mucho más extensa y genérica.

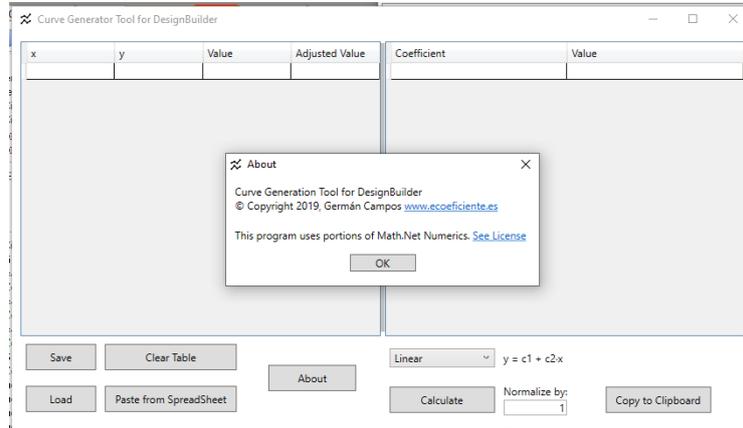


Figura B.8. Apariencia de la herramienta de generación de curvas para suministrar datos de catálogo a Energyplus.

Lo primero es extraer ordenadamente los valores de rendimiento del modelo de Bomba de calor seleccionada a partir del catálogo, como se aprecia en la Figura B.9.

Capacidades caloríficas según EN14511-3: 2011

Unidad 30RQS		Temperatura del aire de entrada del intercambiador de calor de aire, ts (bh), °C																						
LWTR °C	Qh kW	COP q kW/kW	Ap 1/s	-10 (-11)			-7 (-8)			12 (11)														
				Qh kW	COP q	Ap 1/s	Qh kW	COP q	Ap 1/s	Qh kW	COP q	Ap 1/s												
039 30	22	2.21	1.19	15	24	2.26	1.33	19	25	2.45	1.43	22	31	2.98	1.81	36	45	4.03	2.20	47	60	4.47	2.34	62
045	24	2.17	1.29	20	26	2.30	1.49	24	27	2.45	1.57	28	34	2.99	1.98	41	47	4.06	2.24	51	64	4.57	2.58	65
050	28	2.18	1.47	18	30	2.26	1.68	22	32	2.47	1.82	36	40	3.04	2.31	40	45	4.13	2.32	53	63	4.62	2.99	64
060	32	2.15	1.69	18	34	2.31	1.93	23	37	2.43	2.10	27	48	2.98	2.06	42	64	4.05	3.09	63	72	4.53	3.45	68
070	36	2.24	1.94	21	39	2.36	2.20	27	41	2.48	2.38	31	52	2.99	3.01	49	72	4.03	3.43	62	83	4.45	3.92	80
078	40	2.10	2.16	20	44	2.24	2.46	26	48	2.53	2.67	31	58	2.79	3.39	50	81	3.76	3.85	65	92	4.17	4.40	85
080	41	2.25	2.22	14	45	2.39	2.53	18	48	2.49	2.75	21	60	3.01	3.51	34	84	4.07	4.00	44	96	4.55	4.58	87
090	48	2.18	2.57	18	52	2.34	2.90	25	56	2.48	3.17	29	69	3.01	4.02	41	96	4.09	4.51	52	109	4.58	5.21	87
100	57	2.21	1.98	10	57	2.40	3.00	33	60	2.50	3.46	37	75	3.04	4.50	41	104	4.12	4.96	52	118	4.59	5.65	67
120	61	2.29	3.26	21	66	2.43	3.71	26	70	2.53	4.03	31	88	3.02	5.14	50	123	4.07	5.85	64	140	4.62	6.69	83
140	72	2.25	3.86	23	78	2.37	4.36	29	82	2.48	4.71	34	103	3.00	5.97	53	142	4.05	6.60	68	169	4.62	7.77	88
160	89	2.32	5.11	31	84	2.42	5.42	36	88	2.50	6.02	42	110	3.00	6.89	58	154	3.99	7.84	74	188	4.51	9.36	97
039 35	22	2.01	1.20	15	24	2.14	1.34	10	25	2.24	1.44	22	31	2.71	1.80	35	43	3.70	2.04	45	40	4.10	2.32	50
045	24	1.94	1.52	20	26	2.10	1.46	24	27	2.21	1.59	27	34	2.70	1.98	40	47	3.70	2.24	50	55	4.15	2.54	63
050	27	1.98	1.48	11	30	2.10	1.68	22	31	2.20	1.82	26	39	2.71	2.30	39	44	3.74	2.60	49	62	4.19	3.20	62
060	31	1.95	1.69	17	34	2.09	1.93	22	38	2.20	2.09	26	45	2.70	2.85	40	63	3.72	3.01	51	72	4.15	3.43	65
070	36	2.06	1.95	21	39	2.17	2.20	28	41	2.28	2.38	31	51	2.72	3.00	47	71	3.70	3.41	60	82	4.69	3.89	76
078	40	1.91	2.18	20	43	2.03	2.46	25	46	2.12	2.66	30	57	2.55	3.35	48	80	3.45	3.92	62	91	3.83	4.35	81
080	41	2.04	2.22	14	44	2.16	2.51	18	47	2.28	2.72	21	59	2.73	3.46	33	82	3.73	3.95	42	94	4.16	4.51	84
090	47	1.97	2.56	17	51	2.11	2.92	22	54	2.21	3.18	25	68	2.71	4.00	40	95	3.73	4.54	50	108	4.17	5.18	85
100	57	2.11	1.99	9	57	2.18	3.22	69	60	2.27	3.47	68	74	2.75	4.35	40	103	3.76	4.99	50	118	4.21	5.62	64
120	60	2.07	3.36	20	65	2.19	3.70	28	69	2.29	4.00	30	86	2.73	5.07	47	121	3.72	5.77	61	138	4.13	6.60	79
140	72	2.08	3.89	23	77	2.18	4.36	29	81	2.23	4.73	33	101	2.72	5.95	51	141	3.72	6.75	66	161	4.16	7.71	85
160	82	1.98	4.42	24	88	2.11	5.01	30	93	2.20	5.41	35	116	2.83	6.85	55	162	3.68	7.75	71	188	3.96	8.86	92
039 40	22	1.91	1.23	15	23	1.91	1.35	19	24	1.99	1.45	22	30	2.41	1.79	34	42	3.38	2.05	44	48	3.76	2.32	57
045	24	1.85	1.33	20	26	1.84	1.49	24	27	1.95	1.60	27	33	2.39	2.00	40	47	3.37	2.25	49	63	3.77	2.53	61
050	27	1.72	1.49	17	29	1.84	1.68	21	30	1.93	1.82	25	38	2.38	2.20	37	54	3.37	2.58	47	61	3.73	3.04	59
060	30	1.71	1.67	17	33	1.84	1.91	21	35	1.94	2.08	25	44	2.39	2.64	29	62	3.37	2.94	45	71	3.78	3.39	63
070	35	1.85	1.96	21	38	1.94	2.21	26	40	2.02	2.38	30	50	2.41	2.90	45	71	3.37	3.58	57	80	3.74	3.84	73
078	40	1.70	2.20	20	42	1.80	2.47	25	45	1.88	2.66	29	55	2.27	3.33	46	79	3.15	3.76	59	90	3.49	4.28	76
080	40	1.80	2.25	14	43	1.82	2.51	14	45	2.01	2.71	17	57	2.42	3.42	31	81	3.40	3.69	39	95	3.79	4.44	81
090	46	1.73	2.54	18	50	1.86	2.90	21	53	1.95	3.15	25	66	2.38	3.85	38	84	3.37	4.50	49	107	3.79	5.12	82
100	52	1.89	2.85	18	55	1.95	3.22	22	58	2.02	3.47	26	72	2.43	4.38	39	102	3.42	4.89	49	118	3.83	5.56	82
120	59	1.82	3.29	20	63	1.84	3.70	27	67	2.02	3.99	29	83	2.42	5.02	45	119	3.38	5.98	58	138	3.75	6.49	75
140	71	1.85	3.90	22	75	1.94	4.39	28	79	2.01	4.73	32	98	2.41	5.92	50	148	3.39	6.69	63	169	3.60	7.92	81
160	81	1.75	4.48	24	86	1.87	5.03	30	91	1.95	5.41	34	112	2.34	6.77	53	160	3.27	7.67	68	183	3.62	8.74	88
039 45	-	-	-	-	23	1.86	1.37	10	24	1.74	1.46	21	29	2.12	1.78	33	42	3.06	2.00	42	47	3.41	2.26	54
045	-	-	-	-	25	1.88	1.49	15	26	1.89	1.60	19	32	2.09	1.90	29	47	3.05	2.24	46	53	3.41	2.53	59
050	14	1.54	0.79	5	28	1.81	1.89	21	30	1.89	1.82	24	37	2.07	2.27	36	45	3.01	2.58	45	61	3.49	2.90	57
060	15	1.44	0.96	5	32	1.81	1.89	20	-	-	-	42	2.08	2.50	37	61	3.02	2.94	47	70	3.39	3.34	69	
070	25	1.96	1.96	20	-	-	-	-	39	1.79	2.37	28	45	2.13	2.96	44	79	3.04	3.35	35	79	3.58	3.76	69
078	21	1.51	1.17	5	42	1.59	2.49	25	43	1.66	2.06	28	57	2.86	3.71	56	88	3.17	4.22	72	96	3.72	4.22	72
080	40	1.69	2.26	14	42	1.69	2.52	17	44	1.76	2.70	19	54	2.13	3.37	30	80	3.07	3.82	37	91	3.42	4.35	48
090	44	1.52	2.51	16	48	1.62	2.96	20	51	1.70	3.11	25	63	2.08	3.85	37	95	3.01	4.45	46	108	3.59	5.08	59
100	55	1.69	3.09	9	54	1.73	3.22	22	56	1.79	3.46	25	69	2.14	4.30	37	101	3.08	4.84	47	115	3.45	5.49	59
120	60	1.65	3.29	10	62	1.70	3.71	25	65	1.77	3.98	28	80	2.13	4.56	43	117	3.05	5.60	55	133	3.38	6.37	71
140	76	1.80	2.04	6	73	1.72	4.30	28	-	-	-	94	2.12	5.36	45	138	3.08	6.81	60	157	3.45	7.90	77	
160	81	1.75	4.48	24	85	1.85	5.07	29	88	1.72	5.43	34	106	2.07	6.72	41	158	2.96	7.57	50	189	3.29	8.61	83
039 50	-	-	-	-	24	1.52	1.47	21	28	1.67	1.78	32	41	2.73	1.98	40	46	3.64	2.23	51	52	3.62	2.28	51
045	-	-	-	-	15	1.50	0.89	6	29															

extremo de dicho intervalo. Por ejemplo, si el catálogo solo indica valores hasta una temperatura exterior de 12 °C, cuando la Bomba se encuentre trabajando con temperaturas exteriores mayores a ese valor, no extrapola o ajusta los valores de rendimiento, sino que les asigna los correspondientes a 12 °C. Es por ello que en la tabla de la derecha en la Figura B.9 aparecen valores resaltados, que se han obtenido por extrapolación de la tendencia obtenida por los valores por encima del desescarche.

En una hoja de cálculo se listan los valores de temperatura exterior (en este caso de bulbo húmedo) en una columna que será designada como variable X. En otra columna se listan las correspondientes temperaturas de salida del agua caliente del condensador, considerada como la variable Y. Una tercera columna será el valor de rendimiento para las dos temperaturas anteriores. En el caso de Capacidad Calorífica debe estar expresado en Vatios. En la Figura B.10 se aprecia el pegado de valores para la Capacidad Calorífica Qh en la herramienta de generación de curvas. Nótese que es necesario rellenar la casilla “Normalize by:” con el valor de Qh nominal en vatios, así como seleccionar el tipo de regresión a aplicar, en este caso “BiQuadratic”, antes de ejecutar el cálculo.

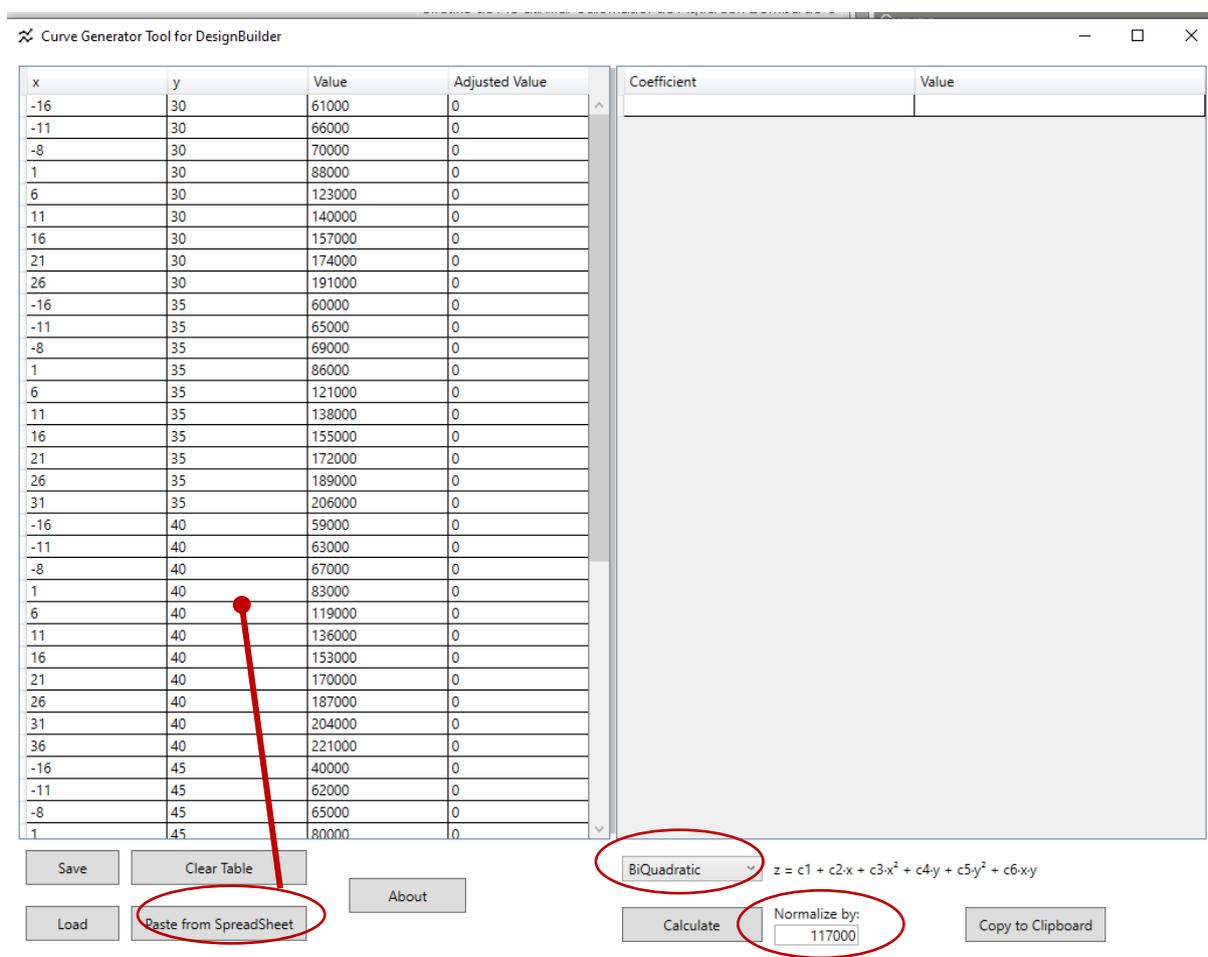
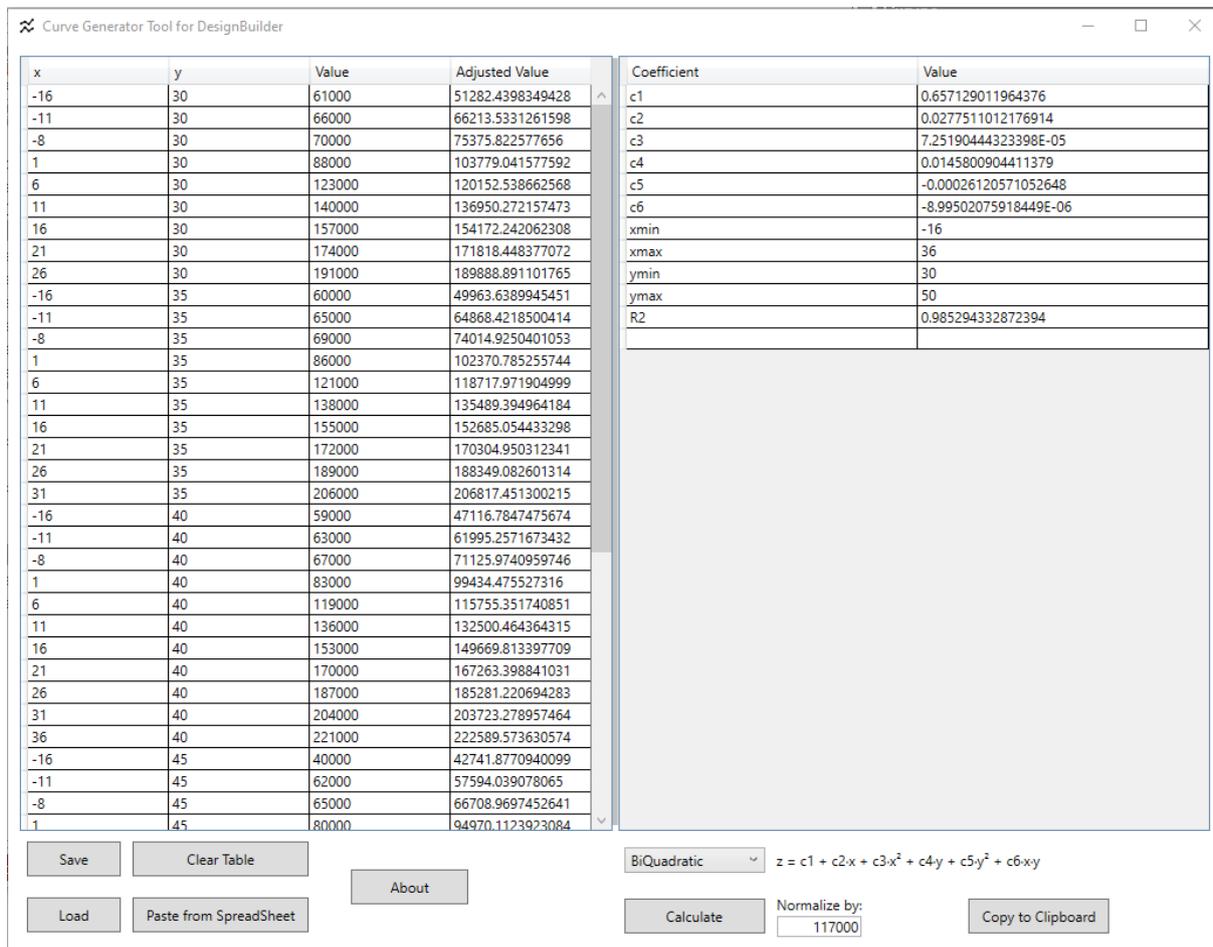


Figura B.10. Pegado de los valores de rendimiento previamente ordenados en una hoja de cálculo, para el caso de la Capacidad Calorífica Qh..

Una vez ejecutado el cálculo, la herramienta proporciona en el bloque izquierdo los valores de los coeficientes de regresión para la aproximación bicuadrática, así como otros parámetros requeridos por EnergyPlus. Al mismo tiempo, en la cuarta columna del bloque derecho

aparecen los valores obtenidos por la regresión, que permite apreciar el grado de precisión en el ajuste obtenido por comparación entre el valor de referencia y el ajustado. Cabe mencionar que el indicador de la idoneidad de la regresión obtenida es el parámetro R2, que debe estar cercano a la unidad lo máximo posible. Finalmente estos valores se trasvasan a al cuadro de diálogo de edición/creación de curvas para EnergyPlus, el cual genera automáticamente la correspondiente curva paramétrica de rendimiento, en este caso para la Capacidad Calorífica (Figura B.12).



The screenshot shows the 'Curve Generator Tool for DesignBuilder' interface. It features a table with columns for 'x', 'y', 'Value', and 'Adjusted Value'. The data points are organized in a grid with x-values ranging from -16 to 45 and y-values from 30 to 45. To the right, a 'Coefficient' table lists parameters c1 through c6, xmin, xmax, ymin, ymax, and R2. Below the tables, there are buttons for 'Save', 'Clear Table', 'About', 'Load', 'Paste from Spreadsheet', 'Calculate', and 'Copy to Clipboard'. A dropdown menu is set to 'BiQuadratic' with the formula $z = c1 + c2x + c3x^2 + c4y + c5y^2 + c6xy$. The 'Normalize by' field is set to 117000.

x	y	Value	Adjusted Value
-16	30	61000	51282.4398349428
-11	30	66000	66213.5331261598
-8	30	70000	75375.822577656
1	30	88000	103779.041577592
6	30	123000	120152.538662568
11	30	140000	136950.272157473
16	30	157000	154172.242062308
21	30	174000	171818.448377072
26	30	191000	189888.891101765
-16	35	60000	49963.6389945451
-11	35	65000	64868.4218500414
-8	35	69000	74014.9250401053
1	35	86000	102370.785255744
6	35	121000	118717.971904999
11	35	138000	135489.394964184
16	35	155000	152685.054433298
21	35	172000	170304.950312341
26	35	189000	188349.082601314
31	35	206000	206817.451300215
-16	40	59000	47116.7847475674
-11	40	63000	61995.2571673432
-8	40	67000	71125.9740959746
1	40	83000	99434.475527316
6	40	119000	115755.351740851
11	40	136000	132500.464364315
16	40	153000	149669.813397709
21	40	170000	167263.398841031
26	40	187000	185281.220694283
31	40	204000	203723.278957464
36	40	221000	222589.573630574
-16	45	40000	42741.8770940099
-11	45	62000	57594.039078065
-8	45	65000	66708.9697452641
1	45	80000	94970.1123923084

Coefficient	Value
c1	0.657129011964376
c2	0.0277511012176914
c3	7.25190444323398E-05
c4	0.0145800904411379
c5	-0.00026120571052648
c6	-8.99502075918449E-06
xmin	-16
xmax	36
ymin	30
ymax	50
R2	0.985294332872394

Figura B.11. Resultados del cálculo de regresión bicuadrática para Capacidad Calorífica.

Todo este procedimiento se repite para el caso del COP. A partir del reordenamiento de los datos de catálogo y su extrapolación para ciertas temperaturas de interés que se mostró en la Figura B.9, se rellena el cuadro de datos del generador de curvas de la Figura B.13 indicando el valor nominal, en este caso COP=3,06. Los resultados del ajuste Bicuadrático son introducidos en el cuadro de creación de curvas para EnergyPlus, obteniendo la curva paramétrica mostrada en la Figura B.14.

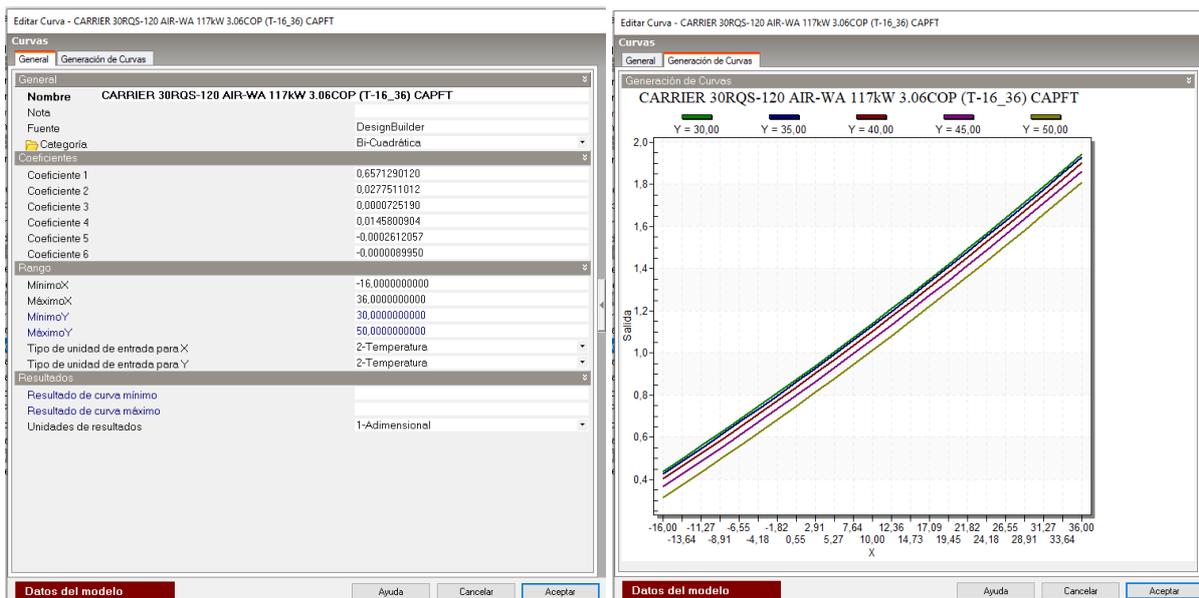


Figura B.12. Trasvase de los resultados del generador de curvas al cuadro de diálogo de definición de curvas para el modelo. Curva de Capacidad Calorífica.

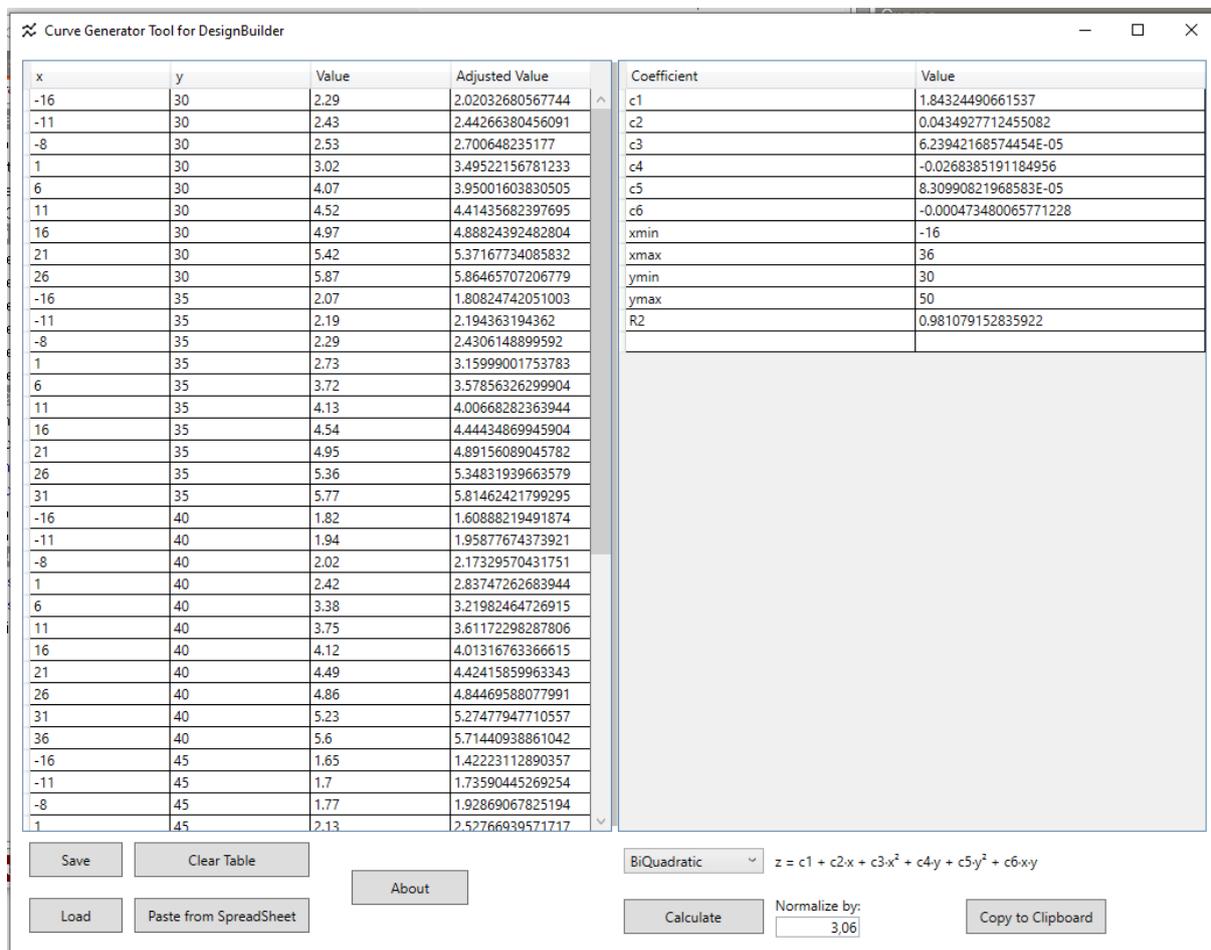


Figura B.13. Resultados del cálculo de regresión bicuadrática para el COP.

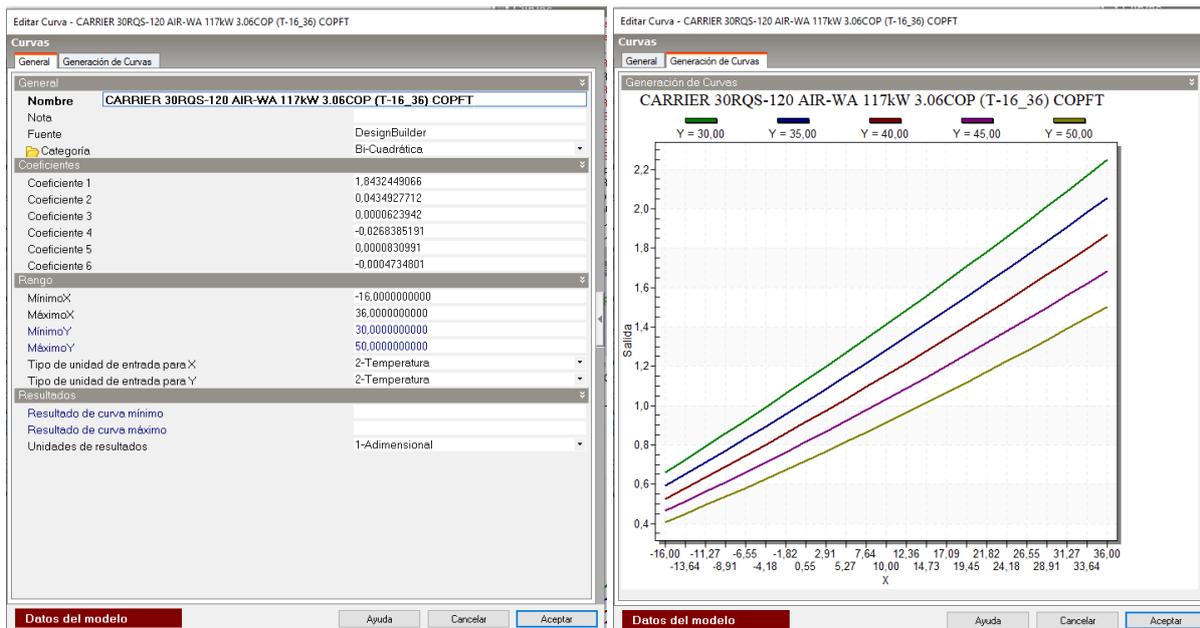


Figura B.14. Traspase de los resultados del generador de curvas al cuadro de diálogo de definición de curvas para el modelo. Curva de COP.

B.3.3. Definiciones para la Bomba de Calor para ACS

Con base en una serie de capturas de la interface gráfica del software DesignBuilder, se describen los parámetros definidos/seleccionados para la Bomba de Calor dedicada al circuito de agua caliente para agua caliente sanitaria ACS.

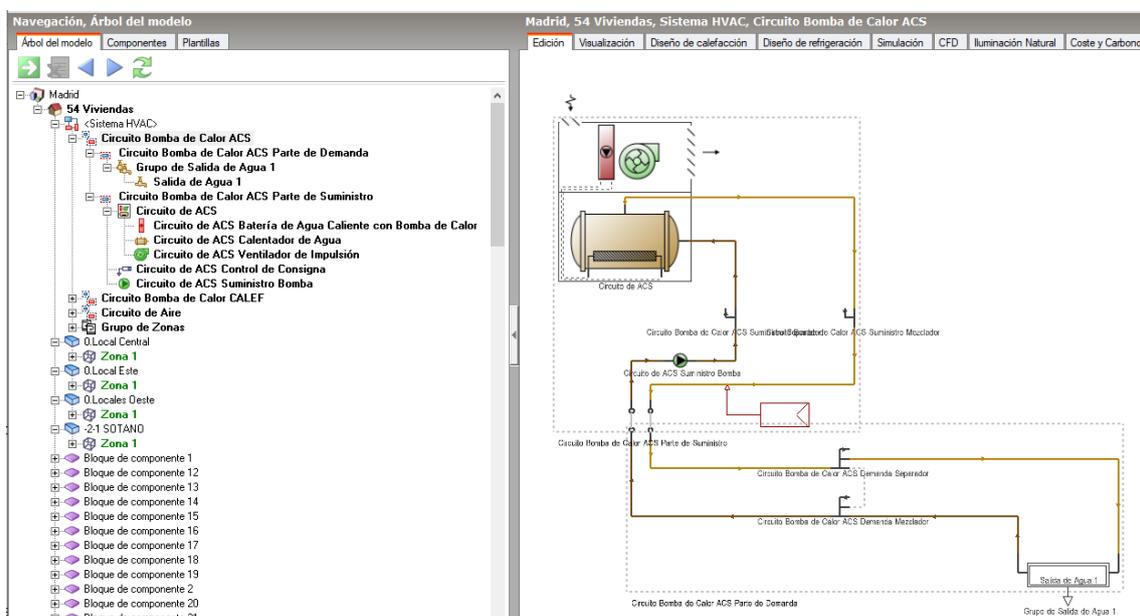
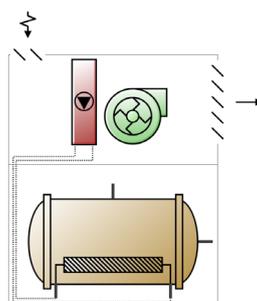


Figura B.15. Árbol de modelo y esquema del componente Circuito Bomba de Calor ACS



Editar Calentador de agua con bomba de calor -

Calentador de agua con bomba de calor

General

Nombre	Circuito de ACS
Programación de disponibilidad	On 24/7
Parámetros del Compresor	
Programación de consigna de temperatura del compresor	0.CARlos Domestic hot water setpoint temperature: Always 6
Diferencia de temperatura de banda muerta (°C)	5,00
Temperatura mínima del aire de entrada para el funcionamiento del compresor (°C)	-4,90
Ubicación del compresor	3-Exterior
Parámetros del Caudal	
Caudal de agua del condensador (m³/s)	Autocalculate
Caudal de aire del evaporador (m³/s)	Autocalculate
Parámetros del Aire de Entrada	
Configuración del aire de entrada	3-Solo aire exterior
Parámetros del Ventilador	
Ubicación del ventilador	2-Después de baterías (succión)
Parámetros de Consumo Auxiliar	
Consumo eléctrico auxiliar en ciclo (W)	0,00
Consumo eléctrico auxiliar fuera de ciclo (W)	0,00
Ubicación de la disipación de calor	2-Exterior

Datos del modelo <admin> Ayuda Cancelar Aceptar

Figura B.16. Propiedades globales de la Bomba de Calor ACS

Editar programación - 0.CARlos Domestic hot water setpoint temperature: Always 60.00

Programaciones

General

Nombre	0.CARlos Domestic hot water setpoint temperature: Always 60.00
Descripción	
Fuente	DesignBuilder
Categoría	<General>
Región	General
Tipo de programación	2-Programación Compacta
Perfiles	
Schedule:Compact	
On,	
Any Number,	
Through: 12/31,	
For: AllDays,	
Until: 24:00, 60 ;	

Datos del modelo Ayuda Cancelar Aceptar

Figura B.17. Detalles de la programación empleada por el compresor. Siempre 60 °C.

En ACS es importante definir una acumulación (Figura B.19). Se recomienda que para una instalación de aerotermia, sea como mínimo sea el del volumen de demanda diaria previsto. En DesignBuilder la temperatura del tanque debe ser siempre inferior a la de salida del compresor, o si no interviene el elemento de calentamiento interno a pesar de que no esté activado, generando un consumo eléctrico de efecto Joule que es absolutamente ficticio.

Editar Batería de la bomba de calor aire-agua -

Batería de la bomba de calor aire-agua

General

General	
Nombre	Circuito de ACS Batería de Agua Caliente con Bomba de C
Capacidad de calefacción nominal (W)	43800,00
CoP Nominal	3,560
Fracción nominal de calor sensible	0,6500
Parámetros del Evaporador	
Temperatura nominal de bulbo seco del aire de entrada del evaporador (°C)	7,00
Temperatura nominal de bulbo húmedo del aire de entrada del evaporador (°C)	6,00
Caudal de aire nominal del evaporador (m³/s)	Autocalculate
<input checked="" type="checkbox"/> Potencia del ventilador del evaporador incluida en el COP nominal	
Parámetros del Condensador	
Temperatura nominal del agua de entrada del condensador (°C)	40,00
Caudal nominal de agua del condensador (m³/s)	Autocalculate
<input checked="" type="checkbox"/> Potencia de la bomba del condensador incluida en el COP nominal	
<input checked="" type="checkbox"/> Calor de la bomba del condensador incluido en la capacidad nominal de calefacción y el COP nominal	
Potencia de la bomba de agua del condensador (W)	150,00
Fracción de calor de la bomba del condensador al agua	0,200
Parámetros del Calentador de Cáster	
Capacidad del calentador de cáster (W)	100,00
Temperatura ambiental máxima para el funcionamiento del calentador de cáster (°C)	5,00
Parámetros de Rendimiento	
Tipo de curvas para temperatura del aire en el evaporador	2-Temperatura de bulbo húmedo
<input checked="" type="checkbox"/> Capacidad de calefacción en función de la temperatura	
<input checked="" type="checkbox"/> Curva de capacidad de calefacción en función de la temperatura	CARRIER (OK) ACS-61AF_045_LR 43.8kW 3.56COP CAPFT
<input type="checkbox"/> Capacidad de calefacción en función de la fracción de caudal de aire	
<input type="checkbox"/> Capacidad de calefacción en función de la fracción de caudal de agua	
<input checked="" type="checkbox"/> COP de calefacción en función de la temperatura	
<input checked="" type="checkbox"/> Curva de COP de calefacción en función de la temperatura	CARRIER (OK-BiCuad) ACS-61AF_045_LR 43.8kW 3.56COP
<input type="checkbox"/> COP de calefacción en función de la fracción de caudal de aire	
<input type="checkbox"/> Capacidad de calefacción en función de la fracción de caudal de agua	
<input type="checkbox"/> Curva de Correlación de Fracción de Carga Parcial	
<input checked="" type="checkbox"/> Curva de correlación de fracción de carga parcial	HPWHPLFFPLR

Datos del modelo <admin> Ayuda Cancelar Aceptar

Figura B.18. Parámetros Nominales y de rendimiento del circuito del refrigerante, exceptuando la compresión.

Editar Calentador de agua -

Calentador de agua

Calentador de agua Dimensionado

General

Nombre	Circuito de ACS Calentador de Agua
Tipo	1-Mixto
Volumen del tanque (m³)	2,0000
Conexión de Planta de Calor Externa	
<input checked="" type="checkbox"/> Conexión de planta de calor externa	
Tiempo de recuperación indirecta de calentamiento de agua (hr)	1,50
Configuración de Temperaturas	
<input checked="" type="checkbox"/> Programación de consigna de temperatura	Heating low control temperature schedule: Always 15,00
Diferencia de temperatura de banda muerta (°C)	5,00
Límite de temperatura máxima (°C)	90,00
Configuración de Transferencia de Calor al Ambiente	
Indicador de temperatura de ambiente	1-Programación
<input checked="" type="checkbox"/> Programación de temperatura de ambiente	Water heater ambient temperature schedule: Always 20,0
Coeficientes de Pérdida de Calor	
Coeficiente de pérdida a temperatura ambiente en ciclo (W/K)	3,00
Coeficiente de pérdida a temperatura ambiente fuera de ciclo	0,00
Elemento de Calentamiento Interno	
<input type="checkbox"/> Elemento de calentamiento interno	
Parámetros de uso	
Rendimiento a la salida	1,000
Caudal nominal - Salida (m³/s)	Autosize
Configuración de la Fuente	
Rendimiento a la entrada	1,000
Caudal nominal - Entrada (m³/s)	Autosize
Modo de control del flujo de la fuente	1-Consigna primaria de calefacción indirecta

Datos del modelo <admin> Ayuda Cancelar Aceptar

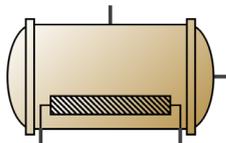


Figura B.19. Parámetros del tanque acumulador para ACS.

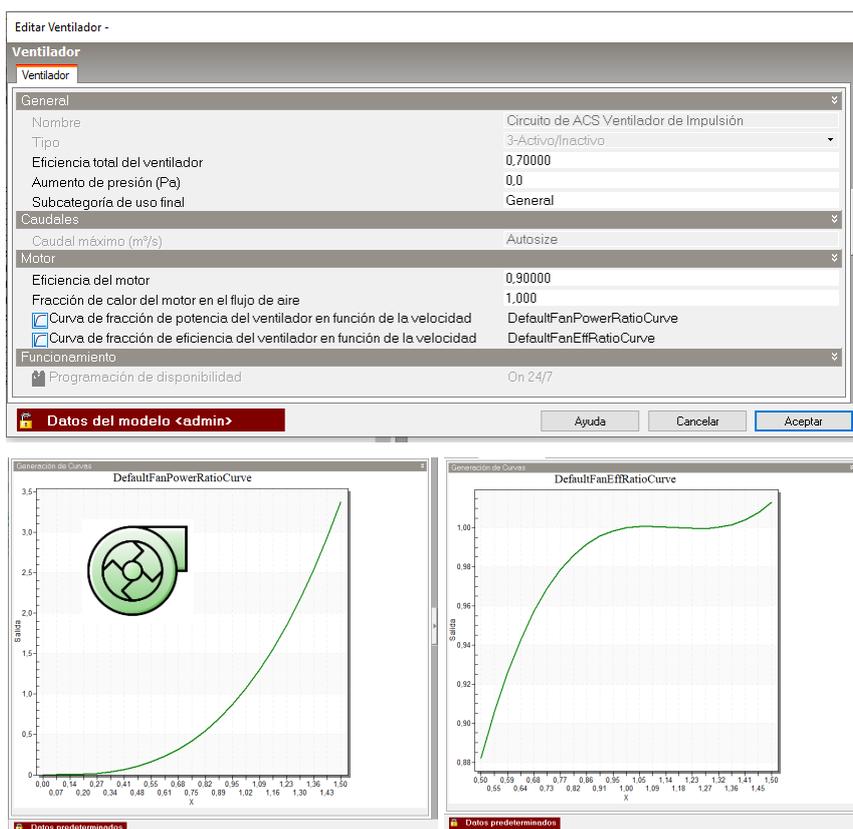


Figura B.20. Parámetros del ventilador en evaporador.

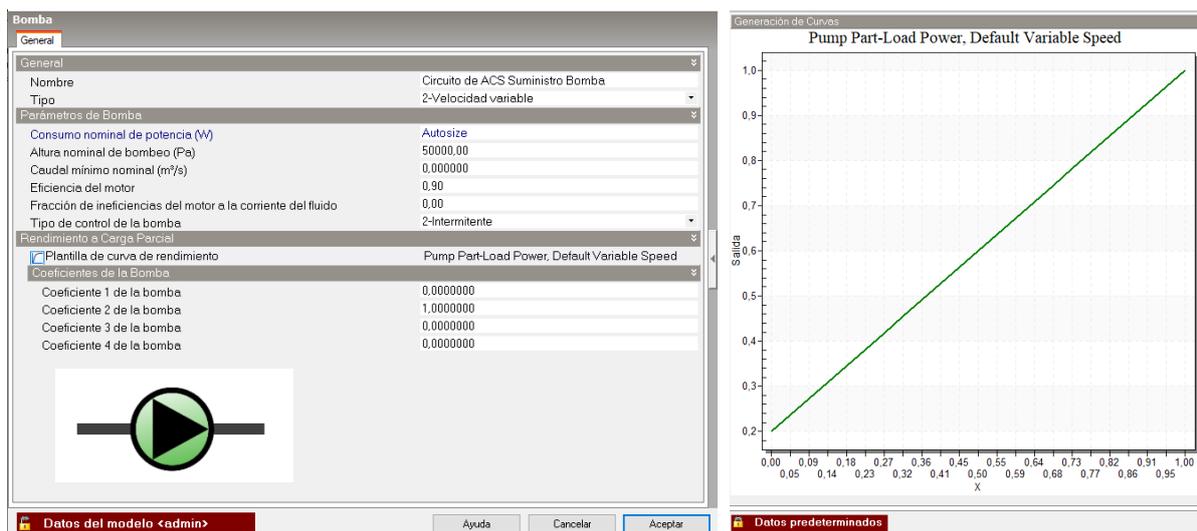


Figura B.21. Bomba impulsora del circuito de agua caliente para ACS.

B.3.4. Generación de las Curvas de Rendimiento Energyplus para Carrier 61AF

Tal y como se ha explicado en el apartado B.3.2, se hace uso de la “herramienta de generación de curvas” para definir las curvas de rendimiento de la Bomba de Calor ACS para DesigBuilder, tanto de COP como de Capacidad Calorífica.

Siguiendo el mismo orden descriptivo de dicho apartado B.3.2, las imágenes de la Figura B.22 a la Figura B.26 exponen el proceso de obtención de curvas EnergyPlus para la Bomba de Calor ACS. En dicho apartado pueden consultarse explicaciones más detalladas relacionadas con cada figura.

El reordenamiento mostrado en la Figura B.22, a diferencia del realizado para la Bomba de Calefacción, no requirió extrapolación pues el rango de temperaturas contemplado en el catálogo es amplio.

Capacidades caloríficas según EN14511-3:2011

61AF 022-105		Temperatura del aire de entrada del intercambiador de calor de aire, bh (h), °C																							
LWLT °C	20 (20)				15 (15)				7 (7)				30 (29)				35 (34)								
	Qh kW	COP q	Ap kPa	Qh kW	COP q	Ap kPa	Qh kW	COP q	Ap kPa	Qh kW	COP q	Ap kPa	Qh kW	COP q	Ap kPa	Qh kW	COP q	Ap kPa	Qh kW	COP q	Ap kPa				
022	30	90	1,95	0,49	1,2	10,3	2,20	0,58	1,6	11,5	2,47	0,66	2,1	12,3	2,63	0,72	2,5	15,2	3,38	0,91	3,8	21,1	4,48	1,01	4,8
030	30	105	1,95	0,58	1,1	12,1	2,19	0,68	1,5	13,7	2,44	0,79	2,0	14,7	2,60	0,86	2,4	18,5	3,34	1,11	3,9	20,5	4,52	1,27	4,9
035	30	135	2,05	0,74	1,3	15,3	2,29	0,78	2,0	17,5	2,54	1,01	2,6	18,8	2,70	1,10	3,0	23,8	3,20	1,41	4,7	26,6	4,46	1,57	5,7
040	30	180	2,25	0,99	1,0	20,5	2,49	1,15	2,4	23,2	2,75	1,33	3,2	24,9	2,91	1,46	3,7	31,6	3,98	1,89	5,9	44,4	4,71	2,13	7,4
045	30	218	2,32	1,19	2,0	25,1	2,58	1,40	2,6	28,4	2,86	1,63	3,5	30,5	3,03	1,76	4,1	37,9	4,66	2,27	6,3	52,3	4,73	2,51	7,6
050	30	281	2,51	1,54	2,9	32,3	2,99	1,81	3,0	36,6	3,25	2,10	4,0	39,3	3,37	2,30	4,7	49,5	4,43	2,66	7,4	64,3	4,29	3,08	8,0
055	30	348	2,71	2,09	3,5	40,2	3,24	2,46	4,8	45,5	3,50	2,83	6,2	49,5	3,60	3,03	7,5	65,3	4,50	3,33	11,9	102,2	4,50	4,80	15,0
060	30	418	2,91	2,79	5,2	47,2	3,42	3,24	6,6	53,8	3,68	3,62	8,2	57,5	3,74	3,82	10,0	77,5	4,30	3,83	15,0	122,2	4,50	6,00	18,0
022	35	90	1,84	0,49	1,2	10,2	2,20	0,57	1,6	11,5	2,30	0,62	2,1	12,3	2,45	0,72	2,4	15,1	3,13	0,93	3,7	20,8	4,11	1,00	4,4
030	35	105	1,85	0,58	1,1	12,1	2,18	0,66	1,5	13,7	2,29	0,76	2,0	14,7	2,43	0,86	2,3	18,5	3,09	1,11	3,7	20,9	4,11	1,26	4,7
035	35	135	1,92	0,74	1,3	15,3	2,31	0,86	1,9	17,3	2,35	1,00	2,5	18,6	2,49	1,09	2,9	23,4	3,10	1,40	4,5	32,6	4,07	1,57	5,5
040	35	180	2,05	0,99	1,0	20,6	2,32	1,15	2,4	23,3	2,55	1,33	3,1	24,9	2,69	1,45	3,6	31,3	3,29	1,87	5,7	44,2	4,31	2,12	7,2
045	35	218	2,19	1,20	1,9	25,0	2,39	1,40	2,6	28,3	2,64	1,63	3,4	30,4	2,76	1,70	4,0	38,0	3,39	2,27	6,2	51,1	4,35	2,50	7,4
050	35	279	1,91	1,53	2,1	32,1	2,13	1,79	2,9	36,2	2,36	2,09	3,8	39,1	2,51	2,28	4,5	49,1	3,14	2,93	7,1	64,9	3,57	3,12	8,0
055	35	349	2,06	2,00	3,5	40,4	2,26	2,65	4,6	45,9	2,48	3,08	6,0	50,4	2,63	3,36	7,1	72,9	3,29	3,42	11,5	101,9	4,24	4,89	14,6
022	40	90	1,72	0,45	1,2	10,1	1,80	0,57	1,5	11,2	2,09	0,66	2,0	11,9	2,21	0,71	2,3	14,5	2,87	0,90	3,5	20,6	3,77	1,00	4,3
030	40	105	1,73	0,58	1,1	12,0	1,81	0,68	1,5	13,4	2,09	0,79	1,9	14,3	2,21	0,86	2,3	18,3	2,84	1,10	3,6	20,0	3,78	1,25	4,6
035	40	135	1,78	0,73	1,4	15,0	1,95	0,85	1,8	16,8	2,12	0,98	2,4	18,0	2,23	1,08	2,8	23,0	2,82	1,38	4,3	32,6	3,72	1,57	5,4
040	40	181	1,87	1,00	1,8	20,4	2,14	1,16	2,3	22,6	2,31	1,33	3,0	24,1	2,42	1,45	3,5	31,0	3,00	1,86	5,5	44,1	3,80	2,12	7,0
045	40	217	2,03	1,20	1,9	24,7	2,20	1,40	2,5	27,7	2,38	1,63	3,3	29,5	2,50	1,73	3,9	37,9	3,11	2,28	6,1	52,2	3,99	2,51	7,8
050	40	277	1,78	1,53	2,1	31,5	1,96	1,79	2,8	35,4	2,14	2,08	3,7	37,8	2,25	2,27	4,3	48,4	2,67	2,91	6,9	65,8	3,68	3,17	8,0
055	40	349	1,95	2,01	3,4	40,1	2,09	2,67	4,5	45,5	2,26	3,05	5,9	50,0	2,37	3,38	7,0	71,7	2,97	3,51	11,2	101,9	3,91	4,90	14,3
022	45	90	1,60	0,45	1,2	10,2	1,81	0,58	1,5	11,2	1,97	0,66	2,0	11,9	2,07	0,71	2,3	14,5	2,82	0,90	3,5	20,6	3,44	1,00	4,2
030	45	105	1,67	0,58	1,1	12,1	1,83	0,65	1,5	13,5	1,98	0,79	1,9	14,3	2,07	0,86	2,2	18,1	2,60	1,09	3,5	25,7	3,45	1,24	4,4
035	45	133	1,70	0,73	1,3	15,1	1,84	0,85	1,8	16,8	1,99	0,98	2,3	18,0	2,08	1,07	2,7	22,7	2,56	1,37	4,2	32,3	3,37	1,56	5,2
040	45	185	1,88	1,01	1,8	20,7	2,02	1,17	2,3	22,9	2,17	1,34	3,0	24,2	2,25	1,45	3,5	30,8	2,73	1,86	5,4	43,8	3,56	2,11	6,8
045	45	221	1,94	1,21	1,9	25,1	2,08	1,41	2,5	27,9	2,23	1,63	3,2	29,6	2,30	1,78	3,8	37,7	2,83	2,27	5,9	52,3	3,64	2,52	7,2
050	45	281	1,70	1,53	2,0	31,8	1,85	1,79	2,7	35,6	2,01	2,08	3,6	38,1	2,07	2,26	4,2	48,7	2,61	2,87	6,7	66,9	3,41	3,32	8,1
055	45	349	1,88	2,04	3,4	40,0	1,93	2,65	4,5	45,3	2,13	3,11	5,9	50,3	2,22	3,38	6,9	71,7	2,72	3,41	11,0	101,9	3,58	4,81	14,0
022	50	90	1,51	0,50	1,1	10,3	1,89	0,58	1,5	11,4	1,83	0,66	2,0	12,0	1,92	0,72	2,3	14,9	2,38	0,90	3,4	20,9	3,13	1,01	4,2
030	50	107	1,58	0,58	1,1	12,2	1,72	0,68	1,4	13,5	1,85	0,79	1,9	14,9	1,99	0,86	2,2	18,0	2,28	1,08	3,4	25,4	3,12	1,22	4,2
035	50	133	1,59	0,73	1,3	15,1	1,72	0,83	1,7	16,8	1,85	0,98	2,2	17,9	1,92	1,07	2,6	22,6	2,33	1,36	4,0	32,0	3,04	1,55	5,1
040	50	189	1,77	1,02	1,8	21,0	1,89	1,18	2,3	23,1	2,01	1,36	3,0	24,4	2,08	1,46	3,4	30,9	2,48	1,86	5,3	43,6	3,21	2,10	6,8
045	50	223	1,83	1,22	1,9	25,3	1,95	1,42	2,5	28,2	2,07	1,65	3,2	29,9	2,14	1,78	3,8	37,7	2,67	2,28	5,8	52,7	3,32	2,54	7,1
050	50	282	1,60	1,53	2,0	31,9	1,73	1,80	2,7	35,6	1,87	2,09	3,5	37,9	1,95	2,27	4,1	48,0	2,30	2,69	6,0	66,1	3,15	3,32	8,2
055	50	344	1,78	2,07	3,4	40,6	1,88	2,70	4,5	45,7	1,98	3,14	5,9	50,0	2,06	3,41	6,9	71,7	2,48	3,43	10,8	102,0	3,27	4,92	13,9
022	55	92	1,51	0,51	1,0	10,4	1,84	0,58	1,6	11,5	1,77	0,62	2,0	12,1	1,85	0,65	2,1	14,9	2,29	0,90	3,4	20,9	3,02	0,93	4,1
030	55	107	1,53	0,57	1,0	12,2	1,66	0,65	1,6	13,6	1,79	0,70	2,0	14,4	1,87	0,74	2,1	17,9	2,29	0,86	2,1	25,3	3,00	0,76	4,1
035	55	134	1,54	0,68	1,0	15,1	1,86	0,83	1,7	16,8	1,78	0,91	2,1	17,9	1,88	1,01	2,5	22,5	2,05	1,17	3,1	31,9	2,94	0,97	4,1
040	55	180	1,72	0,85	1,8	21,2	1,83	0,74	1,0	23,3	1,95	0,95	1,3	24,6	1,96	1,02	1,5	30,7	1,76	1,22	4,5	43,5	3,13	1,56	5,2
045	55	223	1,74	1,08	1,8	25,5	1,88	1,30	1,0	28,4	1,99	1,04	1,4	30,2	2,08	1,13	1,6	37,4	1,68	1,43	2,4	52,9	3,19	2,00	3,0
050	55	283	1,54	0,96	1,8	32,1	1,67	1,13	1,1	35,8	1,80	1,31	1,5	38,1	1,87	1,42	1,7	48,0	2,29	1,81	2,7	66,0	3,02	2,80	4,4
055	55	347	1,71	1,49	1,4	40,1	1,82	1,72	1,9	45,1	1,82	1,98	2,4	50,5	1,98	2,15	2,8	72,9	2,29	2,72	4,4	102,0	3,15	3,58	5,6
022	60	93	1,45	0,25	0,3	10,5	1,38	0,30	0,4	11,8	1,48	0,34	0,6	12,3	1,55	0,37	0,6	15,0	2,14	0,45	0,9	21,0	2,91	0,51	1,2
030	60	108	1,47	0,30	0,3	12,3	1,59	0,35	0,4	13,6	1,70	0,40	0,5	14,5	1,77	0,43	0,6	17,8	2,14	0,54	0,9	25,1	2,91	0,61	1,1
035	60	134	1,47	0,37	0,4	15,2	1,58	0,45	0,5	16,9	1,69	0,49	0,6	18,0	1,75	0,52	0,7	22,5	2,10	0,68	1,1	31,8	2,74	0,77	1,4
040	60	193	1,64	0,53	0,5	21,5	1,75	0,60	0,7	23,8	1,85	0,69	0,9	24,9	1,91	0,74	1,0	30,0	2,05	0,93	1,5	43,4	2,92	1,05	1,8
045	60	227	1,71	0,62	0,5	25,8	1,79	0,72	0,7	28,7	1,88	0,84	0,9	30,5	1,99	0,91	1,0	38,0	2,29	1,15	1,6	53,3	2,99	1,29	2,0
050	60	284	1,47	0,78	0,6	32,3	1,58	0,81	0,7	36,0	1,70	1,05	1,0	38,3	1,77	1,14	1,1	48,3	2,14	1,05	1,8	67,9	2,80	1,65	2,2
055	60	343	1,67	1,21	0,9	40,8	1,74	1,40	1,2	45,9	1,82	1,60	1,6	50,3	1,88	1,74	1,8	72,5	2,24	2,19	2,9	102,3	2,94	2,48	3,6
022	65	98																							

En la Figura B.23 se aprecia el resultado del ajuste polinomial de la Capacidad Calorífica para el caso de esta Bomba de ACS. Nótese que se ha empleado un ajuste cúbico que producía un mejor valor de R2. Las correspondientes curvas paramétricas de Capacidad Calorífica obtenidas para EnergyPlus a partir de este ajuste se aprecian en la

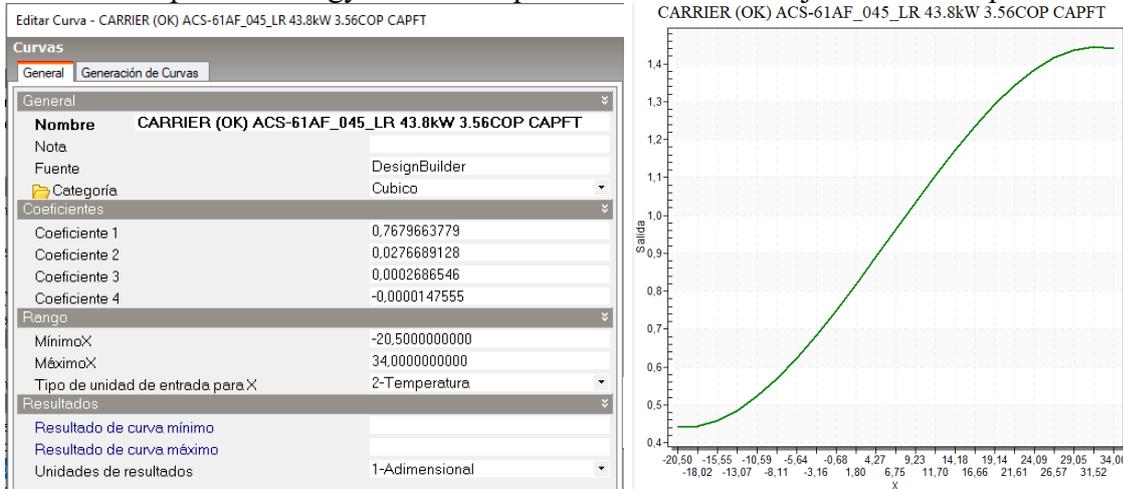


Figura B.24.

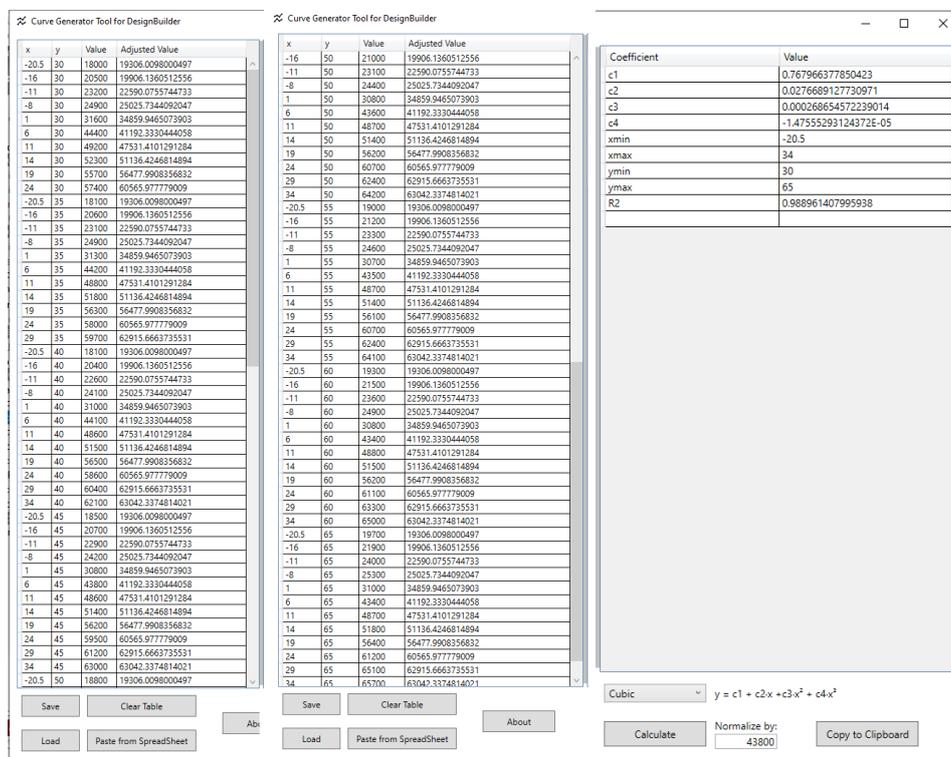


Figura B.23. Resultados del cálculo de regresión cúbica para Capacidad Calorífica en BdC ACS.

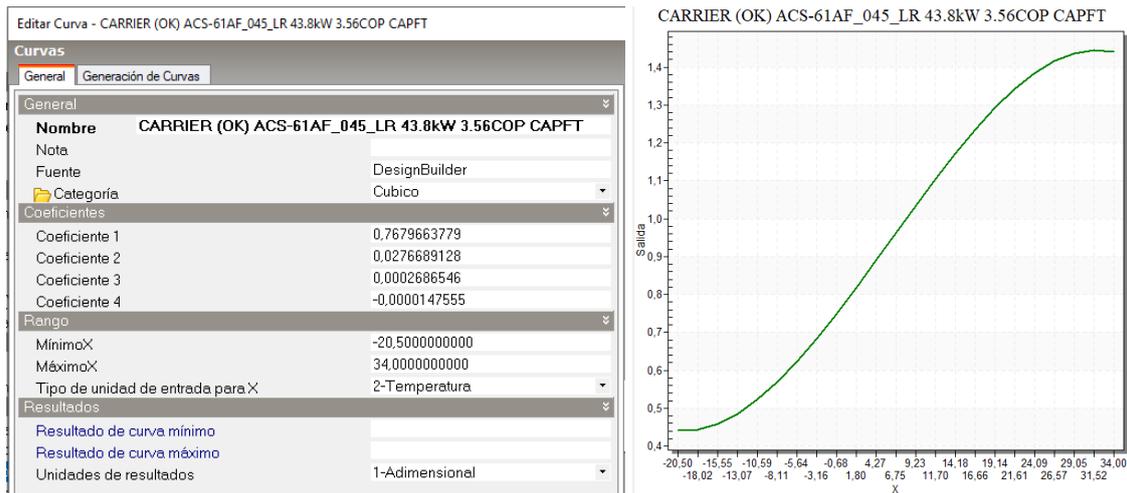


Figura B.24. Traslase de los resultados del generador de curvas al cuadro de diálogo de definición de curvas para el modelo. Curva de Capacidad Calorífica BdC ACS.

En la Figura B.25 se aprecia el resultado del ajuste polinomial del COP para el caso de esta Bomba de ACS. El ajuste con mejor R2 para este parámetro ha sido el Bicuadrático. Las correspondientes curvas paramétricas de COP obtenidas para EnergyPlus a partir de este ajuste se aprecian en la Figura B.26.

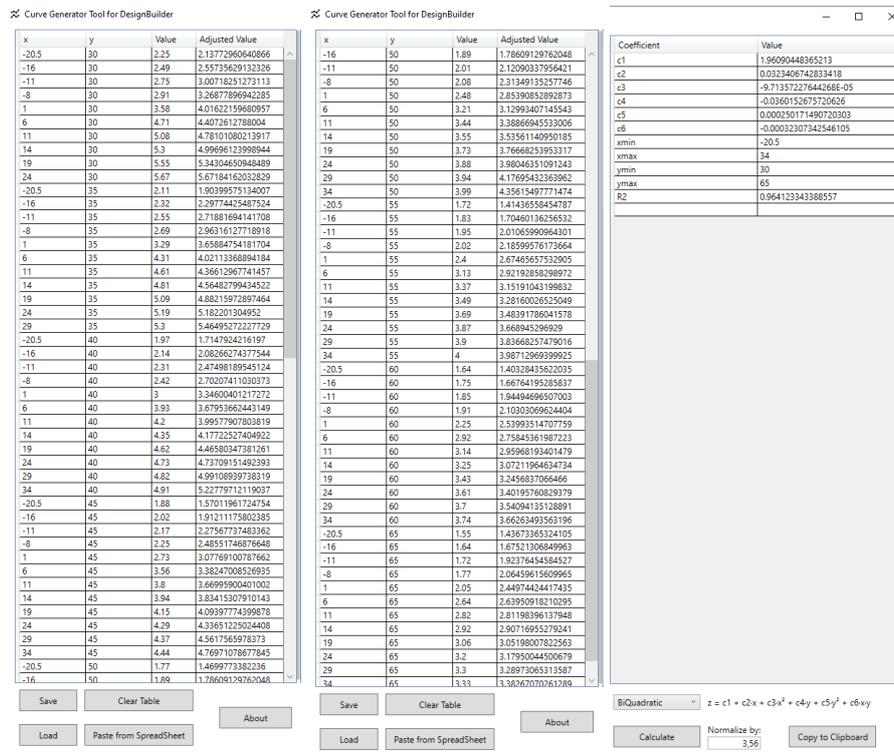


Figura B.25. Resultados del cálculo de regresión bicuadrática para el COP en BdC-ACS.

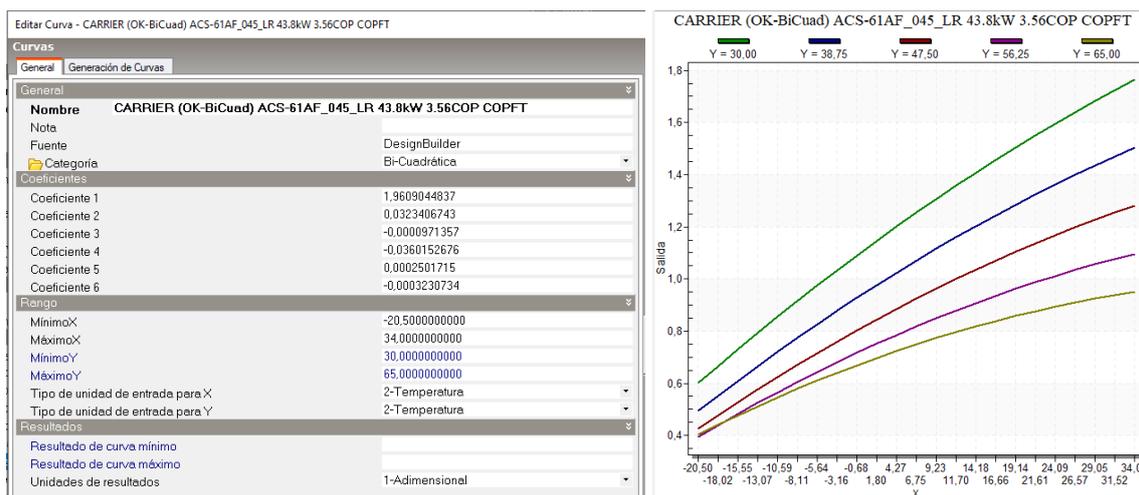
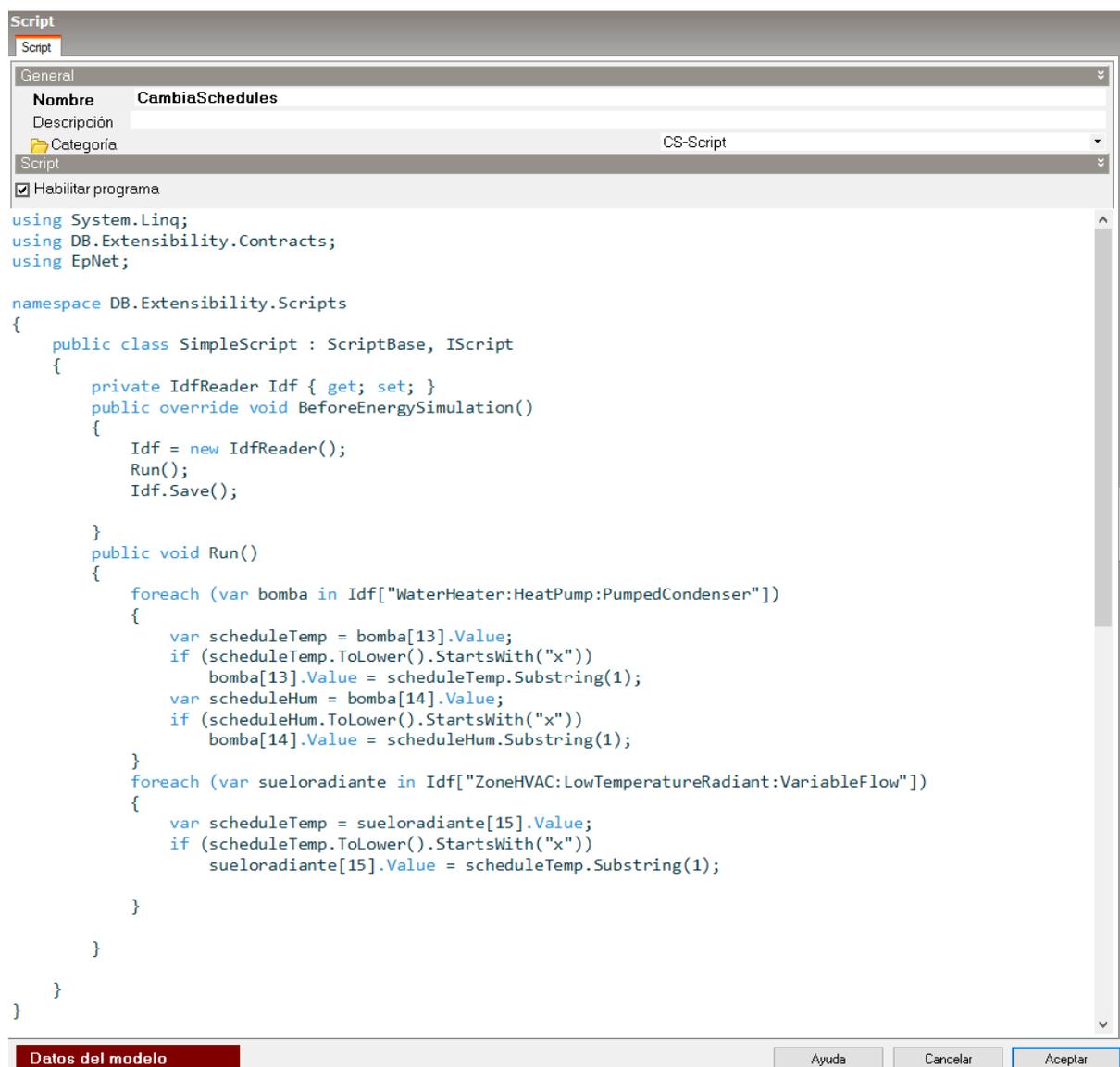


Figura B.26. Trasvase de los resultados del generador de curvas al cuadro de diálogo de definición de curvas para el modelo. Curva de COP en BdC-ACS.

B.3.5. Scripts para la programación del aire exterior en los evaporadores de las Bombas de Calor

En la Figura B.27 se aprecia el script general que le indica a DesignBuilder que para los componentes de Bomba de Calor y de suelo radiante hay un tratamiento especial para ciertas programaciones. En el caso de la Bomba de Calor se trata de la variable entrada de aire al evaporador, y en el caso del suelo radiante se trata de la temperatura de consigna para el aire de la zona a la que sirve en calefacción. La sistemática del script consiste en que si el nombre de la programación comienza por una letra “x” minúscula, el componente debe buscar las instrucciones que hay en el sub-script cuyo nombre corresponde a la cadena de caracteres que hay después de la x.



```

using System.Linq;
using DB.Extensibility.Contracts;
using EpNet;

namespace DB.Extensibility.Scripts
{
    public class SimpleScript : ScriptBase, IScript
    {
        private IdfReader Idf { get; set; }
        public override void BeforeEnergySimulation()
        {
            Idf = new IdfReader();
            Run();
            Idf.Save();
        }

        public void Run()
        {
            foreach (var bomba in Idf["WaterHeater:HeatPump:PumpedCondenser"])
            {
                var scheduleTemp = bomba[13].Value;
                if (scheduleTemp.ToLower().StartsWith("x"))
                    bomba[13].Value = scheduleTemp.Substring(1);
                var scheduleHum = bomba[14].Value;
                if (scheduleHum.ToLower().StartsWith("x"))
                    bomba[14].Value = scheduleHum.Substring(1);
            }
            foreach (var sueloradiante in Idf["ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:VariableFlow"])
            {
                var scheduleTemp = sueloradiante[15].Value;
                if (scheduleTemp.ToLower().StartsWith("x"))
                    sueloradiante[15].Value = scheduleTemp.Substring(1);
            }
        }
    }
}

```

Figura B.27. Script general que le indica a los componentes de Bomba de Calor y de Suelo Radiante que debe remitirse a los correspondientes sub-script.

Las instrucciones de los diferentes sub-scripts se pueden apreciar en la Figura B.28. En esencia lo que le indican a DesignBuilder es la ubicación de los archivos “csv” con los valores horarios o diez minutos a tomar como dato en la variable en cuestión. En ocasiones se trata de archivos csv independientes, o en otras ocasiones un mismo archivo csv contiene varias columnas de datos. En este último caso el script no solo contiene la ubicación del archivo, sino que también indica la columna que corresponde al dato a leer. Cabe indicar que es aconsejable que el paso de tiempo seleccionado para la simulación DesignBuilder en general, coincida con el menor paso de tiempo de estos archivos de datos de entrada.

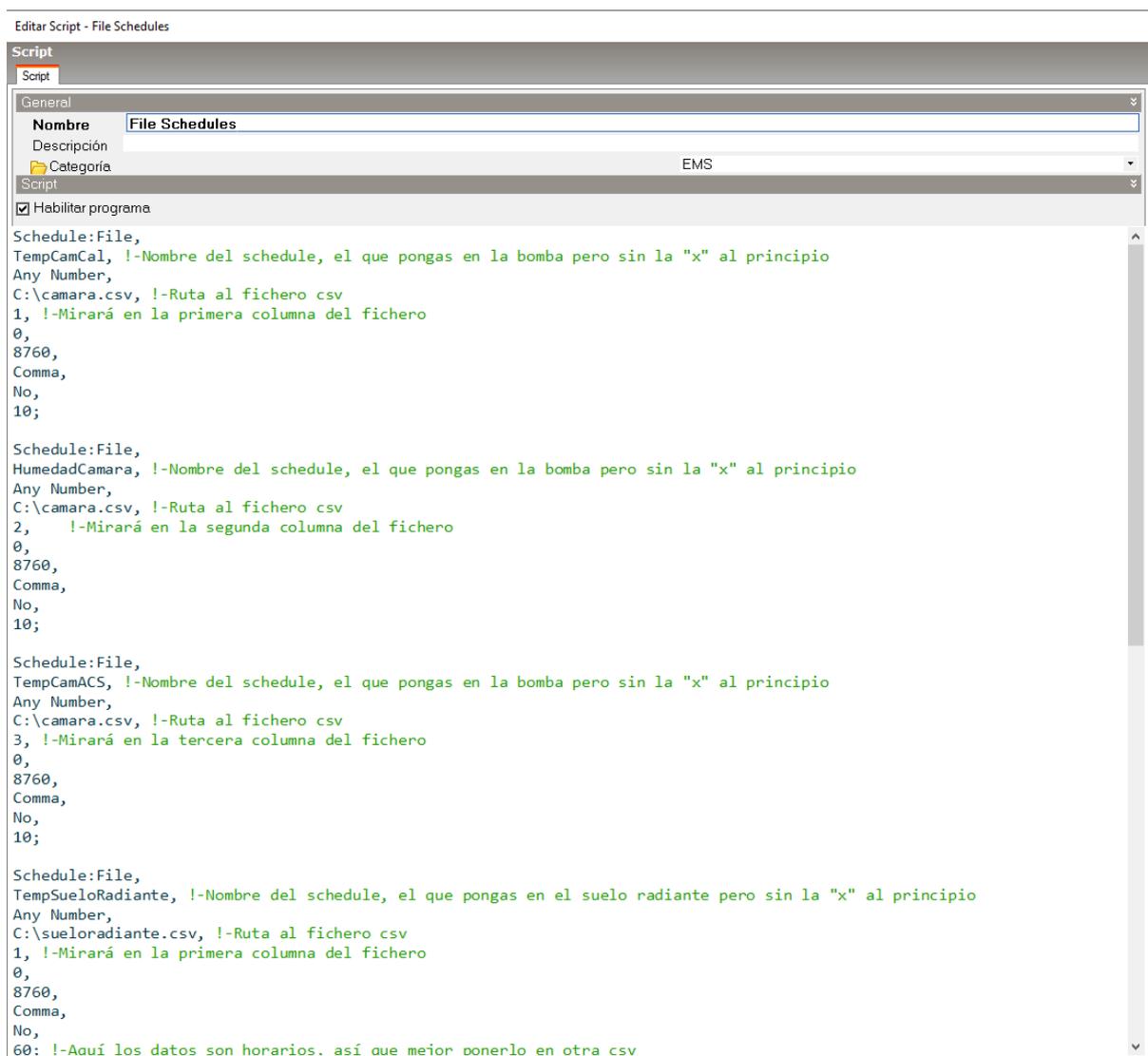


Figura B.28. Sub-scripts que le indican a los componentes la ruta donde se encuentran los archivos “csv” con los datos horarios a ingresar..

B.4. Reporte DesignBuilder de las simulaciones

B.4.1. Reporte de la simulación del edificio de referencia

A continuación, se incluye las ocho primeras páginas del resumen generado automáticamente por DesignBuilder para la simulación del modelo de edificio definido para la ciudad de Madrid, sin fachada FVFF. En estas se pueden comprobar los principales parámetros de interés de la simulación

Program Version: EnergyPlus, Version 8.9.0-40101eaafd, VMD=2021.02.28 14:31

[Table of Contents](#)

Tabular Output Report in Format: HTML

Building: Building

Environment: MADRID (01-01:31-12) ** MADRID - ESP IWEC Data WMO# = 082210

Simulation Timestamp: 2021-02-28 14:38:41

Report: Annual Building Utility Performance Summary

[Table of Contents](#)

For: Entire Facility

Timestamp: 2021-02-28 14:38:41

Values gathered over 8760.00 hours

Site and Source Energy

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m2]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m2]
Total Site Energy	202520.86	48.37	48.37
Net Site Energy	202520.86	48.37	48.37
Total Source Energy	641383.58	153.20	153.20
Net Source Energy	641383.58	153.20	153.20

Site to Source Energy Conversion Factors

	Site=>Source Conversion Factor
Electricity	3.167
Natural Gas	1.084
District Cooling	1.056
District Heating	3.613
Steam	0.250
Gasoline	1.050
Diesel	1.050
Coal	1.050
Fuel Oil #1	1.050
Fuel Oil #2	1.050
Propane	1.050
Other Fuel 1	1.000
Other Fuel 2	1.000

Building Area

	Area [m2]
Total Building Area	4186.63
Net Conditioned Building Area	4186.63
Unconditioned Building Area	0.00

End Uses

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	46760.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	60513.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	24331.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	341.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	70574.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1711.96
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	202520.86	0.00	0.00	0.00	0.00	1711.96

End Uses By Subcategory

	Subcategory	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cooling	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	General	46760.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX5XP1A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX5XP1C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX5XP1B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX3XP1A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX3XP1C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX3XP1B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX1XP1A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX1XP1C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX1XP1B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX5XP2A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX5XP2C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX5XP2B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX3XP2A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX3XP2C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX3XP2B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX1XP2A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX1XP2C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX1XP2B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX5XP3A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX5XP3C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX5XP3B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX3XP3A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX3XP3C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX3XP3B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX1XP3A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX1XP3C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX1XP3B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX5XP4A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX5XP4C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX5XP4B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX3XP4A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX3XP4C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX3XP4B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX1XP4A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX1XP4C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX1XP4B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP5:VAX5XP5A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP5:VAX5XP5C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP5:VAX5XP5B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP5:VAX3XP5A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP5:VAX3XP5C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX3XP5B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP5A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP5C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP5B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX5XP6A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX5XP6C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX5XP6B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX3XP6A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX3XP6C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX3XP6B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP6A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP6C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP6B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	General	24331.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	General	341.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	Water Heater	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Water Heater Parasitic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1711.96
	Other	70574.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Normalized Metrics

Utility Use Per Conditioned Floor Area

	Electricity Intensity [kWh/m2]	Natural Gas Intensity [kWh/m2]	Additional Fuel Intensity [kWh/m2]	District Cooling Intensity [kWh/m2]	District Heating Intensity [kWh/m2]	Water Intensity [m3/m2]
Lighting	11.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	22.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41
Other	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	48.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41

Utility Use Per Total Floor Area

	Electricity Intensity [kWh/m2]	Natural Gas Intensity [kWh/m2]	Additional Fuel Intensity [kWh/m2]	District Cooling Intensity [kWh/m2]	District Heating Intensity [kWh/m2]	Water Intensity [m3/m2]
Lighting	11.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	22.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41
Other	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	48.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41

Electric Loads Satisfied

	Electricity [kWh]	Percent Electricity [%]
Fuel-Fired Power Generation	0.000	0.00
High Temperature Geothermal*	0.000	0.00
Photovoltaic Power	0.000	0.00
Wind Power	0.000	0.00
Power Conversion	0.000	0.00
Net Decrease in On-Site Storage	0.000	0.00
Total On-Site Electric Sources	0.000	0.00
Electricity Coming From Utility	202520.864	100.00
Surplus Electricity Going To Utility	0.000	0.00
Net Electricity From Utility	202520.864	100.00
Total On-Site and Utility Electric Sources	202520.864	100.00
Total Electricity End Uses	202520.864	100.00

On-Site Thermal Sources

	Heat [kWh]	Percent Heat [%]
Water-Side Heat Recovery	0.00	0.00
Air to Air Heat Recovery for Cooling	1127.18	0.95
Air to Air Heat Recovery for Heating	117192.40	99.05
High-Temperature Geothermal*	0.00	0.00
Solar Water Thermal	0.00	0.00
Solar Air Thermal	0.00	0.00
Total On-Site Thermal Sources	118319.58	100.00

Water Source Summary

	Water [m3]	Percent Water [%]
Rainwater Collection	0.00	0.00
Condensate Collection	0.00	0.00
Groundwater Well	0.00	0.00
Total On Site Water Sources	0.00	0.00
-	-	-
Initial Storage	0.00	0.00
Final Storage	0.00	0.00
Change in Storage	0.00	0.00
-	-	-
Water Supplied by Utility	1711.96	100.00
-	-	-
Total On Site, Change in Storage, and Utility Water Sources	1711.96	100.00
Total Water End Uses	1711.96	100.00

Setpoint Not Met Criteria

	Degrees [deltaC]
Tolerance for Zone Heating Setpoint Not Met Time	1.11
Tolerance for Zone Cooling Setpoint Not Met Time	1.11

Comfort and Setpoint Not Met Summary

	Facility [Hours]
Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	919.67
Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	3080.33
Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	4258.83

Note 1: An asterisk (*) indicates that the feature is not yet implemented.

Table of Contents

- [Top](#)
- [Annual Building Utility Performance Summary](#)
- [Input Verification and Results Summary](#)
- [Demand End Use Components Summary](#)
- [Component Sizing Summary](#)
- [Adaptive Comfort Summary](#)
- [Climate Data Summary](#)
- [Envelope Summary](#)
- [Lighting Summary](#)
- [Equipment Summary](#)
- [HVAC Sizing Summary](#)
- [System Summary](#)
- [Outdoor Air Summary](#)
- [Object Count Summary](#)
- [Sensible Heat Gain Summary](#)
- [Standard 62.1 Summary](#)

Report: **Input Verification and Results Summary**

[Table of Contents](#)

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2021-02-28 14:38:41**

General

	Value
Program Version and Build	EnergyPlus, Version 8.9.0-40101eaafd, YMD=2021.02.28 14:31
RunPeriod	MADRID (01-01:31-12)
Weather File	MADRID - ESP IWEC Data WWD#=#082210
Latitude [deg]	40.45
Longitude [deg]	-3.5
Elevation [m]	582.00
Time Zone	1.00
North Axis Angle [deg]	0.00

Rotation for Appendix G [deg]	0.00
Hours Simulated [hrs]	8760.00

ENVELOPE

Window-Wall Ratio

	Total	North (315 to 45 deg)	East (45 to 135 deg)	South (135 to 225 deg)	West (225 to 315 deg)
Gross Wall Area [m ²]	7705.35	3893.82	876.28	2058.97	876.28
Above Ground Wall Area [m ²]	6386.38	3401.30	709.31	1566.45	709.31
Window Opening Area [m ²]	711.15	292.68	22.01	374.45	22.01
Gross Window-Wall Ratio [%]	9.23	7.52	2.51	18.19	2.51
Above Ground Window-Wall Ratio [%]	11.14	8.60	3.10	23.90	3.10

Conditioned Window-Wall Ratio

	Total	North (315 to 45 deg)	East (45 to 135 deg)	South (135 to 225 deg)	West (225 to 315 deg)
Gross Wall Area [m ²]	4839.19	2582.84	450.52	1355.32	450.52
Above Ground Wall Area [m ²]	4839.19	2582.84	450.52	1355.32	450.52
Window Opening Area [m ²]	676.03	257.56	22.01	374.45	22.01
Gross Window-Wall Ratio [%]	13.97	9.97	4.89	27.63	4.89
Above Ground Window-Wall Ratio [%]	13.97	9.97	4.89	27.63	4.89

Skylight-Roof Ratio

	Total
Gross Roof Area [m ²]	2178.29
Skylight Area [m ²]	0.00
Skylight-Roof Ratio [%]	0.00

PERFORMANCE

Zone Summary

	Area [m ²]	Conditioned (Y/N)	Part of Total Floor Area (Y/N)	Volume [m ³]	Multipliers	Above Ground Gross Wall Area [m ²]	Underground Gross Wall Area [m ²]	Window Glass Area [m ²]	Opening Area [m ²]	Lighting [W/m ²]	People [m ² per person]	Plug and Process [W/m ²]
OXLOCALCENTRAL:ZONA1	66.07	No	No	324.75	1.00	228.48	0.00	0.00	0.00			
OXLOCALESTE:ZONA1	179.72	No	No	879.16	1.00	365.91	0.00	0.00	0.00			
VAP1:VAX5XP1VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP1:VAX5XP1A	85.40	Yes	Yes	215.20	1.00	125.07	0.00	9.84	13.08	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX5XP1C	85.94	Yes	Yes	216.58	1.00	75.44	0.00	10.09	13.24	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX5XP1B	61.00	Yes	Yes	153.72	1.00	71.52	0.00	8.30	11.10	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX3XP1A	86.15	Yes	Yes	217.09	1.00	74.99	0.00	10.09	13.24	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX3XP1VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP1:VAX3XP1C	85.94	Yes	Yes	216.58	1.00	75.16	0.00	10.09	13.24	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX3XP1B	61.00	Yes	Yes	153.72	1.00	70.96	0.00	8.29	11.09	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX1XP1A	86.15	Yes	Yes	217.09	1.00	74.72	0.00	10.09	13.24	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX1XP1VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP1:VAX1XP1C	85.20	Yes	Yes	214.69	1.00	125.49	0.00	9.83	13.07	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX1XP1B	61.00	Yes	Yes	153.72	1.00	71.99	0.00	8.29	11.09	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX5XP2VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP2:VAX5XP2A	85.40	Yes	Yes	219.05	1.00	125.07	0.00	9.87	13.12	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX5XP2C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX5XP2B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.33	11.14	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX3XP2A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX3XP2VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP2:VAX3XP2C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX3XP2B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX1XP2A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX1XP2VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP2:VAX1XP2C	85.20	Yes	Yes	218.53	1.00	125.50	0.00	9.86	13.11	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX1XP2B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX5XP3VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP3:VAX5XP3A	85.40	Yes	Yes	219.05	1.00	125.07	0.00	9.87	13.12	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX5XP3C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX5XP3B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.33	11.14	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX3XP3A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX3XP3VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP3:VAX3XP3C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX3XP3B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX1XP3A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX1XP3VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			

VAP3.VAX1XP3C	85.20	Yes	Yes	218.53	1.00	125.50	0.00	9.86	13.11	3.4000	20.00	4.4000
VAP3.VAX1XP3B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX5XP4VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP4.VAX5XP4A	85.40	Yes	Yes	219.05	1.00	125.07	0.00	9.87	13.12	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX5XP4C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX5XP4B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.33	11.14	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX3XP4A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX3XP4VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP4.VAX3XP4C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX3XP4B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX1XP4A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX1XP4VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP4.VAX1XP4C	85.20	Yes	Yes	218.53	1.00	125.50	0.00	9.86	13.11	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX1XP4B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX5XP5VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP5.VAX5XP5A	85.40	Yes	Yes	219.05	1.00	125.07	0.00	9.87	13.12	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX5XP5C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX5XP5B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.33	11.14	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX3XP5A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX3XP5VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP5.VAX3XP5C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX3XP5B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX1XP5A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX1XP5VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP5.VAX1XP5C	85.20	Yes	Yes	218.53	1.00	125.49	0.00	9.86	13.11	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX1XP5B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX5XP6VEST	28.03	No	No	71.48	1.00	24.93	0.00	1.50	1.95			
VAP6.VAX5XP6A	85.40	Yes	Yes	217.76	1.00	156.97	0.00	9.87	13.12	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX5XP6C	85.94	Yes	Yes	219.15	1.00	95.61	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX5XP6B	61.00	Yes	Yes	155.55	1.00	89.51	0.00	8.33	11.14	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX3XP6A	86.15	Yes	Yes	219.67	1.00	95.13	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX3XP6VEST	28.03	No	No	71.48	1.00	24.93	0.00	1.50	1.95			
VAP6.VAX3XP6C	85.94	Yes	Yes	219.15	1.00	95.61	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX3XP6B	61.00	Yes	Yes	155.55	1.00	89.51	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX1XP6A	86.15	Yes	Yes	219.67	1.00	95.13	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX1XP6VEST	28.03	No	No	71.48	1.00	24.93	0.00	1.50	1.95			
VAP6.VAX1XP6C	85.20	Yes	Yes	217.25	1.00	157.45	0.00	9.86	13.11	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX1XP6B	61.00	Yes	Yes	155.55	1.00	89.51	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
X2X1SOTANO:ZONA1	1656.34	No	No	10320.60	1.00	86.99	1318.97	0.00	0.00			
OXLOCALESOESTE:ZONA1	311.73	No	No	1445.67	1.00	495.11	0.00	0.00	0.00			
Total	4186.63			10696.84		4839.19	0.00	510.86	676.03	3.4000	20.00	4.4000
Conditioned Total	4186.63			10696.84		4839.19	0.00	510.86	676.03	3.4000	20.00	4.4000
Unconditioned Total	2718.40			14263.07		1547.19	1318.97	26.95	35.12	0.0000		0.0000
Not Part of Total	2718.40			14263.07		1547.19	1318.97	26.95	35.12	0.0000		0.0000

Report: Demand End Use Components Summary

[Table of Contents](#)

For: Entire Facility

Timestamp: 2021-02-28 14:38:41

End Uses

	Electricity [W]	Natural Gas [W]	Propane [W]	District Cooling [W]	Steam [W]	Water [m3/s]
Time of Peak	24-JAN-19:49	-	-	-	-	01-JAN-07:10
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	14234.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	18421.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	2777.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	136.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	47401.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Total End Uses	82970.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
----------------	----------	------	------	------	------	------

End Uses By Subcategory

	Subcategory	Electricity [W]	Natural Gas [W]	Propane [W]	District Cooling [W]	Steam [W]	Water [m3/s]
Heating	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	General	14294.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAX1P1A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAX1P1C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAX1P1B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAX1P2A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAX1P2C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAX1P2B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAX1P3A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAX1P3C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAX1P3B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAX1P4A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAX1P4C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAX1P4B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAX1P5A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAX1P5C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAX1P5B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAX1P6A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAX1P6C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAX1P6B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exterior Equipment	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	General	2777.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	General	136.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Water Systems	Water Heater	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Water Heater Parasitic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Report: **Component Sizing Summary**

[Table of Contents](#)

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2021-02-28 14:38:41**

AirTerminal:SingleDuct:ConstantVolume:NoReheat

	Design Size Maximum Air Flow Rate [m3/s]
VAP1:VAXSP1A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP1:VAXSP1C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP1:VAXSP1B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP1:VAXSP1A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP1:VAXSP1C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP1:VAXSP1B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP1:VAX1P1A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP1:VAX1P1C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP1:VAX1P1B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP2:VAXSP2A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP2:VAXSP2C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP2:VAXSP2B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP2:VAXSP2A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP2:VAXSP2C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP2:VAXSP2B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP2:VAX1P2A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP2:VAX1P2C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP2:VAX1P2B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP3:VAXSP3A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP3:VAXSP3C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP3:VAXSP3B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP3:VAXSP3A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP3:VAXSP3C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP3:VAXSP3B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP3:VAX1P3A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP3:VAX1P3C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP3:VAX1P3B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP4:VAXSP4A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP4:VAXSP4C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP4:VAXSP4B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP4:VAXSP4A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP4:VAXSP4C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP4:VAXSP4B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP4:VAX1P4A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP4:VAX1P4C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP4:VAX1P4B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP5:VAXSP5A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP5:VAXSP5C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP5:VAXSP5B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP5:VAXSP5A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP5:VAXSP5C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP5:VAXSP5B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP5:VAX1P5A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP5:VAX1P5C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP5:VAX1P5B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP6:VAXSP6A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP6:VAXSP6C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP6:VAXSP6B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP6:VAXSP6A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP6:VAXSP6C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP6:VAXSP6B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP6:VAX1P6A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP6:VAX1P6C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP6:VAX1P6B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607

User-Specified values were used. Design Size values were used if no User-Specified values were provided.

B.4.2. Reporte de la simulación del edificio con FVFF

A continuación, se incluye las ocho primeras páginas del resumen generado automáticamente por DesignBuilder para la simulación del modelo de edificio definido para la ciudad de Madrid, con fachada FVFF. En estas se pueden comprobar los principales parámetros de interés de la simulación.

Program Version: EnergyPlus, Version 8.9.0-40101eaafd, WMD=2021.02.28 14:31

[Table of Contents](#)

Tabular Output Report in Format: HTML

Building: Building

Environment: MADRID (01-01:31-12) ** MADRID - ESP IWEC Data WMO# = 082210

Simulation Timestamp: 2021-02-28 14:38:41

Report: Annual Building Utility Performance Summary

[Table of Contents](#)

For: Entire Facility

Timestamp: 2021-02-28 14:38:41

Values gathered over 8760.00 hours

Site and Source Energy

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m2]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m2]
Total Site Energy	202520.86	48.37	48.37
Net Site Energy	202520.86	48.37	48.37
Total Source Energy	641383.58	153.20	153.20
Net Source Energy	641383.58	153.20	153.20

Site to Source Energy Conversion Factors

	Site=>Source Conversion Factor
Electricity	3.167
Natural Gas	1.084
District Cooling	1.056
District Heating	3.613
Steam	0.250
Gasoline	1.050
Diesel	1.050
Coal	1.050
Fuel Oil #1	1.050
Fuel Oil #2	1.050
Propane	1.050
Other Fuel 1	1.000
Other Fuel 2	1.000

Building Area

	Area [m2]
Total Building Area	4186.63
Net Conditioned Building Area	4186.63
Unconditioned Building Area	0.00

End Uses

	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	46760.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	60513.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	24331.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	341.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	70574.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1711.96
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	202520.86	0.00	0.00	0.00	0.00	1711.96

End Uses By Subcategory

	Subcategory	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cooling	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	General	46760.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX5XP1A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX5XP1C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX5XP1B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX3XP1A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX3XP1C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX3XP1B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX1XP1A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX1XP1C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP1:VAX1XP1B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX5XP2A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX5XP2C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX5XP2B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX3XP2A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX3XP2C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX3XP2B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX1XP2A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX1XP2C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP2:VAX1XP2B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX5XP3A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX5XP3C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX5XP3B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX3XP3A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX3XP3C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX3XP3B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX1XP3A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX1XP3C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP3:VAX1XP3B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX5XP4A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX5XP4C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX5XP4B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX3XP4A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX3XP4C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX3XP4B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX1XP4A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX1XP4C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP4:VAX1XP4B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP5:VAX5XP5A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP5:VAX5XP5C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP5:VAX5XP5B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP5:VAX3XP5A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTRIC EQUIPMENT#VAP5:VAX3XP5C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX3XP5B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP5A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP5C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP5B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX5XP6A#02	1234.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX5XP6C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX5XP6B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX3XP6A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX3XP6C#02	1242.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX3XP6B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP6A#02	1245.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP6C#02	1231.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTRIC EQUIPMENT#VAP6:VAX1XP6B#02	881.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	General	24331.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	General	341.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	Water Heater	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Water Heater Parasitic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1711.96
	Other	70574.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Normalized Metrics

Utility Use Per Conditioned Floor Area

	Electricity Intensity [kWh/m2]	Natural Gas Intensity [kWh/m2]	Additional Fuel Intensity [kWh/m2]	District Cooling Intensity [kWh/m2]	District Heating Intensity [kWh/m2]	Water Intensity [m3/m2]
Lighting	11.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	22.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41
Other	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	48.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41

Utility Use Per Total Floor Area

	Electricity Intensity [kWh/m2]	Natural Gas Intensity [kWh/m2]	Additional Fuel Intensity [kWh/m2]	District Cooling Intensity [kWh/m2]	District Heating Intensity [kWh/m2]	Water Intensity [m3/m2]
Lighting	11.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	22.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41
Other	14.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	48.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41

Electric Loads Satisfied

	Electricity [kWh]	Percent Electricity [%]
Fuel-Fired Power Generation	0.000	0.00
High Temperature Geothermal*	0.000	0.00
Photovoltaic Power	0.000	0.00
Wind Power	0.000	0.00
Power Conversion	0.000	0.00
Net Decrease in On-Site Storage	0.000	0.00
Total On-Site Electric Sources	0.000	0.00
Electricity Coming From Utility	202520.864	100.00
Surplus Electricity Going To Utility	0.000	0.00
Net Electricity From Utility	202520.864	100.00
Total On-Site and Utility Electric Sources	202520.864	100.00
Total Electricity End Uses	202520.864	100.00

On-Site Thermal Sources

	Heat [kWh]	Percent Heat [%]
Water-Side Heat Recovery	0.00	0.00
Air to Air Heat Recovery for Cooling	1127.18	0.95
Air to Air Heat Recovery for Heating	117192.40	99.05
High-Temperature Geothermal*	0.00	0.00
Solar Water Thermal	0.00	0.00
Solar Air Thermal	0.00	0.00
Total On-Site Thermal Sources	118319.58	100.00

Water Source Summary

	Water [m ³]	Percent Water [%]
Rainwater Collection	0.00	0.00
Condensate Collection	0.00	0.00
Groundwater Well	0.00	0.00
Total On Site Water Sources	0.00	0.00
-	-	-
Initial Storage	0.00	0.00
Final Storage	0.00	0.00
Change in Storage	0.00	0.00
-	-	-
Water Supplied by Utility	1711.96	100.00
-	-	-
Total On Site, Change in Storage, and Utility Water Sources	1711.96	100.00
Total Water End Uses	1711.96	100.00

Setpoint Not Met Criteria

	Degrees [deltaC]
Tolerance for Zone Heating Setpoint Not Met Time	1.11
Tolerance for Zone Cooling Setpoint Not Met Time	1.11

Comfort and Setpoint Not Met Summary

	Facility [Hours]
Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	919.67
Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	3080.33
Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	4258.83

Note 1: An asterisk (*) indicates that the feature is not yet implemented.

Table of Contents

[Top](#)
[Annual Building Utility Performance Summary](#)
[Input Verification and Results Summary](#)
[Demand End Use Components Summary](#)
[Component Sizing Summary](#)
[Adaptive Comfort Summary](#)
[Climate Data Summary](#)
[Envelope Summary](#)
[Lighting Summary](#)
[Equipment Summary](#)
[HVAC Sizing Summary](#)
[System Summary](#)
[Outdoor Air Summary](#)
[Object Count Summary](#)
[Sensible Heat Gain Summary](#)
[Standard 62.1 Summary](#)

Report: **Input Verification and Results Summary**

[Table of Contents](#)

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2021-02-28 14:38:41**

General

	Value
Program Version and Build	EnergyPlus, Version 8.9.0-40101eaafd, YMD=2021.02.28 14:31
RunPeriod	MADRID (01-01:31-12)
Weather File	MADRID - ESP IWEC Data WWD#=#082210
Latitude [deg]	40.45
Longitude [deg]	-3.5
Elevation [m]	582.00
Time Zone	1.00
North Axis Angle [deg]	0.00

Rotation for Appendix G [deg]	0.00
Hours Simulated [hrs]	8760.00

ENVELOPE

Window-Wall Ratio

	Total	North (315 to 45 deg)	East (45 to 135 deg)	South (135 to 225 deg)	West (225 to 315 deg)
Gross Wall Area [m ²]	7705.35	3893.82	876.28	2058.97	876.28
Above Ground Wall Area [m ²]	6386.38	3401.30	709.31	1566.45	709.31
Window Opening Area [m ²]	711.15	292.68	22.01	374.45	22.01
Gross Window-Wall Ratio [%]	9.23	7.52	2.51	18.19	2.51
Above Ground Window-Wall Ratio [%]	11.14	8.60	3.10	23.90	3.10

Conditioned Window-Wall Ratio

	Total	North (315 to 45 deg)	East (45 to 135 deg)	South (135 to 225 deg)	West (225 to 315 deg)
Gross Wall Area [m ²]	4839.19	2582.84	450.52	1355.32	450.52
Above Ground Wall Area [m ²]	4839.19	2582.84	450.52	1355.32	450.52
Window Opening Area [m ²]	676.03	257.56	22.01	374.45	22.01
Gross Window-Wall Ratio [%]	13.97	9.97	4.89	27.63	4.89
Above Ground Window-Wall Ratio [%]	13.97	9.97	4.89	27.63	4.89

Skylight-Roof Ratio

	Total
Gross Roof Area [m ²]	2178.29
Skylight Area [m ²]	0.00
Skylight-Roof Ratio [%]	0.00

PERFORMANCE

Zone Summary

	Area [m ²]	Conditioned (Y/N)	Part of Total Floor Area (Y/N)	Volume [m ³]	Multipliers	Above Ground Gross Wall Area [m ²]	Underground Gross Wall Area [m ²]	Window Glass Area [m ²]	Opening Area [m ²]	Lighting [W/m ²]	People [m ² per person]	Plug and Process [W/m ²]
OXLOCALCENTRAL:ZONA1	66.07	No	No	324.75	1.00	228.48	0.00	0.00	0.00			
OXLOCALESTE:ZONA1	179.72	No	No	879.16	1.00	365.91	0.00	0.00	0.00			
VAP1:VAX5XP1VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP1:VAX5XP1A	85.40	Yes	Yes	215.20	1.00	125.07	0.00	9.84	13.08	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX5XP1C	85.94	Yes	Yes	216.58	1.00	75.44	0.00	10.09	13.24	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX5XP1B	61.00	Yes	Yes	153.72	1.00	71.52	0.00	8.30	11.10	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX3XP1A	86.15	Yes	Yes	217.09	1.00	74.99	0.00	10.09	13.24	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX3XP1VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP1:VAX3XP1C	85.94	Yes	Yes	216.58	1.00	75.16	0.00	10.09	13.24	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX3XP1B	61.00	Yes	Yes	153.72	1.00	70.96	0.00	8.29	11.09	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX1XP1A	86.15	Yes	Yes	217.09	1.00	74.72	0.00	10.09	13.24	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX1XP1VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP1:VAX1XP1C	85.20	Yes	Yes	214.69	1.00	125.49	0.00	9.83	13.07	3.4000	20.00	4.4000
VAP1:VAX1XP1B	61.00	Yes	Yes	153.72	1.00	71.99	0.00	8.29	11.09	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX5XP2VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP2:VAX5XP2A	85.40	Yes	Yes	219.05	1.00	125.07	0.00	9.87	13.12	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX5XP2C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX5XP2B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.33	11.14	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX3XP2A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX3XP2VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP2:VAX3XP2C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX3XP2B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX1XP2A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX1XP2VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP2:VAX1XP2C	85.20	Yes	Yes	218.53	1.00	125.50	0.00	9.86	13.11	3.4000	20.00	4.4000
VAP2:VAX1XP2B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX5XP3VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP3:VAX5XP3A	85.40	Yes	Yes	219.05	1.00	125.07	0.00	9.87	13.12	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX5XP3C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX5XP3B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.33	11.14	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX3XP3A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX3XP3VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP3:VAX3XP3C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX3XP3B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX1XP3A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP3:VAX1XP3VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			

VAP3.VAX1XP3C	85.20	Yes	Yes	218.53	1.00	125.50	0.00	9.86	13.11	3.4000	20.00	4.4000
VAP3.VAX1XP3B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX5XP4VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP4.VAX5XP4A	85.40	Yes	Yes	219.05	1.00	125.07	0.00	9.87	13.12	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX5XP4C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX5XP4B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.33	11.14	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX3XP4A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX3XP4VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP4.VAX3XP4C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX3XP4B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX1XP4A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX1XP4VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP4.VAX1XP4C	85.20	Yes	Yes	218.53	1.00	125.50	0.00	9.86	13.11	3.4000	20.00	4.4000
VAP4.VAX1XP4B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX5XP5VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP5.VAX5XP5A	85.40	Yes	Yes	219.05	1.00	125.07	0.00	9.87	13.12	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX5XP5C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX5XP5B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.33	11.14	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX3XP5A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX3XP5VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP5.VAX3XP5C	85.94	Yes	Yes	220.44	1.00	77.08	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX3XP5B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX1XP5A	86.15	Yes	Yes	220.96	1.00	76.65	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX1XP5VEST	28.03	No	No	71.90	1.00	19.73	0.00	1.50	1.95			
VAP5.VAX1XP5C	85.20	Yes	Yes	218.53	1.00	125.49	0.00	9.86	13.11	3.4000	20.00	4.4000
VAP5.VAX1XP5B	61.00	Yes	Yes	156.47	1.00	73.11	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX5XP6VEST	28.03	No	No	71.48	1.00	24.93	0.00	1.50	1.95			
VAP6.VAX5XP6A	85.40	Yes	Yes	217.76	1.00	156.97	0.00	9.87	13.12	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX5XP6C	85.94	Yes	Yes	219.15	1.00	95.61	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX5XP6B	61.00	Yes	Yes	155.55	1.00	89.51	0.00	8.33	11.14	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX3XP6A	86.15	Yes	Yes	219.67	1.00	95.13	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX3XP6VEST	28.03	No	No	71.48	1.00	24.93	0.00	1.50	1.95			
VAP6.VAX3XP6C	85.94	Yes	Yes	219.15	1.00	95.61	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX3XP6B	61.00	Yes	Yes	155.55	1.00	89.51	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX1XP6A	86.15	Yes	Yes	219.67	1.00	95.13	0.00	10.12	13.28	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX1XP6VEST	28.03	No	No	71.48	1.00	24.93	0.00	1.50	1.95			
VAP6.VAX1XP6C	85.20	Yes	Yes	217.25	1.00	157.45	0.00	9.86	13.11	3.4000	20.00	4.4000
VAP6.VAX1XP6B	61.00	Yes	Yes	155.55	1.00	89.51	0.00	8.32	11.13	3.4000	20.00	4.4000
XX1SOTANO:ZONA1	1656.34	No	No	10320.60	1.00	86.99	1318.97	0.00	0.00			
OXLOCALESOESTE:ZONA1	311.73	No	No	1445.67	1.00	495.11	0.00	0.00	0.00			
Total	4186.63			10696.84		4839.19	0.00	510.86	676.03	3.4000	20.00	4.4000
Conditioned Total	4186.63			10696.84		4839.19	0.00	510.86	676.03	3.4000	20.00	4.4000
Unconditioned Total	2718.40			14263.07		1547.19	1318.97	26.95	35.12	0.0000		0.0000
Not Part of Total	2718.40			14263.07		1547.19	1318.97	26.95	35.12	0.0000		0.0000

Report: Demand End Use Components Summary

[Table of Contents](#)

For: Entire Facility

Timestamp: 2021-02-28 14:38:41

End Uses

	Electricity [W]	Natural Gas [W]	Propane [W]	District Cooling [W]	Steam [W]	Water [m3/s]
Time of Peak	24-JAN-19:49	-	-	-	-	01-JAN-07:10
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	14234.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	18421.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	2777.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	136.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	47401.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Total End Uses	82970.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
----------------	----------	------	------	------	------	------

End Uses By Subcategory

	Subcategory	Electricity [W]	Natural Gas [W]	Propane [W]	District Cooling [W]	Steam [W]	Water [m3/s]
Heating	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cooling	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Lighting	General	14294.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAXSP1B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAX1P1A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAX1P1C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP1:VAX1P1B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAXSP2B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAX1P2A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAX1P2C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP2:VAX1P2B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAXSP3B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAX1P3A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAX1P3C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP3:VAX1P3B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAXSP4B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAX1P4A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAX1P4C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP4:VAX1P4B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAXSP5B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAX1P5A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAX1P5C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP5:VAX1P5B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6A#02	375.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6C#02	378.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAXSP6B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAX1P6A#02	379.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAX1P6C#02	374.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ELECTR.IC.EQUIPMENT#VAP6:VAX1P6B#02	268.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exterior Equipment	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	General	2777.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	General	136.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Water Systems	Water Heater	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Water Heater Parasitic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Report: Component Sizing Summary

[Table of Contents](#)

For: Entire Facility

Timestamp: 2021-02-28 14:38:41

AirTerminal:SingleDuct:ConstantVolume:NoReheat

	Design Size Maximum Air Flow Rate [m3/s]
VAP1:VAXSP1A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP1:VAXSP1C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP1:VAXSP1B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP1:VAXSP1A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP1:VAXSP1C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP1:VAXSP1B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP1:VAX1P1A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP1:VAX1P1C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP1:VAX1P1B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP2:VAXSP2A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP2:VAXSP2C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP2:VAXSP2B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP2:VAXSP2A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP2:VAXSP2C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP2:VAXSP2B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP2:VAX1P2A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP2:VAX1P2C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP2:VAX1P2B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP3:VAXSP3A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP3:VAXSP3C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP3:VAXSP3B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP3:VAXSP3A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP3:VAXSP3C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP3:VAXSP3B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP3:VAX1P3A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP3:VAX1P3C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP3:VAX1P3B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP4:VAXSP4A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP4:VAXSP4C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP4:VAXSP4B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP4:VAXSP4A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP4:VAXSP4C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP4:VAXSP4B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP4:VAX1P4A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP4:VAX1P4C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP4:VAX1P4B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP5:VAXSP5A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP5:VAXSP5C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP5:VAXSP5B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP5:VAXSP5A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP5:VAXSP5C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP5:VAXSP5B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP5:VAX1P5A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP5:VAX1P5C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP5:VAX1P5B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP6:VAXSP6A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033049
VAP6:VAXSP6C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP6:VAXSP6B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP6:VAXSP6A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP6:VAXSP6C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033260
VAP6:VAXSP6B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607
VAP6:VAX1P6A VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.033338
VAP6:VAX1P6C VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.032971
VAP6:VAX1P6B VAC CONDUCTO ÚNICO SIN RECALENTAMIENTO	0.023607

User-Specified values were used. Design Size values were used if no User-Specified values were provided.

ANEXO C

Publicación 2. Hibridación de FVFF con bomba de calor.

RESUMEN

En el volumen 261 de 2022 de la revista científica *Energy & Buildings* (disponible online desde febrero de 2022), se publicó el trabajo denominado: “*A photovoltaic forced ventilated façade (PV-FVF) as heat source for a heat pump: Assessing its energetical profit in nZEB buildings*”. Esta publicación resume el aporte al conocimiento de la presente tesis doctoral, exponiendo principalmente el trabajo desarrollado en los capítulos 3 y 4. El tipo de licencia editorial de este artículo permite su libre divulgación, por lo que se anexa en su totalidad.



Contents lists available at ScienceDirect

Energy & Buildings

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enb



A photovoltaic forced ventilated façade (PV-FVF) as heat source for a heat pump: Assessing its energetical profit in nZEB buildings



C. García-Gáfaró*, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal, J.M. Hidalgo-Betanzos, A. Erkoreka-González

ENEDI Research Group, Energy Engineering Department, University of the Basque Country (UPV/EHU), Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1, 48013 Bilbao, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 July 2021
Revised 22 January 2022
Accepted 19 February 2022
Available online 26 February 2022

Keywords:

Heat pump
PASLINK
Dynamic testing
Energy efficiency
Sustainable development
Ventilated façade
BIPV
PV-FVF

ABSTRACT

The European Union is changing its energy model towards a more efficient and sustainable one. In this new outlook, the Heat Pump (HP) has become a leading technology in the building energy sector. The use of the air source heat pump (ASHP) in the energy installations in the so-called nZEB low consumption buildings is currently on the increase. Furthermore, its performance improves when supported by solar energy, which can be achieved through the use of hybrid solar thermal photovoltaic elements (BIPV/T) integrated into the building's façade, thus reducing consumption by 9 or 10%. However, the improvement can be even higher if a thermal storage system is incorporated.

This research demonstrates the potential of one particular photovoltaic forced ventilated façade (PV-FVF) used as support for a heating and DHW system based on ASHPs, taking advantage of the entire building as a thermal accumulation system. For this, an "Adaptive Indoor Temperature Setpoint Strategy", called $T_{adaptive}$, is proposed as one alternative mode of operation for the PV-FVF plus ASHP hybridisation. The objective is to transfer thermal energy to the building when the façade is obtaining a higher solar thermal gain. The PV-FVF was characterised experimentally in exterior conditions in a PASLINK test. It was modelled numerically and analysed on a whole building level using a thermal simulation programme into which the predictions of the numerical model were incorporated.

Using as an example a residential building with underfloor heating in the city of Madrid, Spain, it was found that the use of the $T_{adaptive}$ as the accumulation strategy could double the savings obtained with an ASHP supported by a PV-FVF, reducing heating consumption by 19.9%; while including the photovoltaic generation of the outer leaf reduces the total annual final energy for heat demand by 20.7%. The viability of this proposal is therefore demonstrated on the basis of existing technology as an alternative to reduce even further the energy consumption of nZEB type buildings for which the contribution of this hybridisation can be significant.

© 2022 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introduction.

The research presented in this work focuses on the less studied application of the use of a Photovoltaic Forced Ventilated Façade (PV-FVF) as an energy source for a heat pump (HP). This study not only demonstrates the potential of the PV-FVF as a heat source, but also the importance of an adaptative heat energy transfer strategy for the building system when the PV-FVF is used as a support system for the HP. The sphere of application of this work is limited to nZEB buildings in which the low energy consumption allows significant improvements to be obtained. Similarly, the best behaviour of the Heat Pumps is obtained when they use low temperature heating systems. The application of this type of sys-

tem for buildings is quite recent. The evaluation of the said potential of the PV-FVF, and the strategy to take advantage of it, is based on currently existing technologies already available on the market, notwithstanding the limitations that these technologies may have. Thus, this work demonstrates that the hybridisation of a PV-FVF plus HP is perfectly applicable nowadays following the recommendations posed in this study.

Currently, one of the strategic priorities of all countries is the creation and development of techniques, systems, technology and regulations that contribute to the reduction and/or optimization of energy consumption in key sectors of the economy, both in the context of sustainable development [1,2] and interdependence in a global market [3]. Building is one of these key sectors due to its significant weight in energy demand [4], especially that required to keep buildings conditioned according to current standards of thermal comfort with air quality. In the case of the Euro-

* Corresponding author.

E-mail address: carlos.garciaga@ehu.es (C. García-Gáfaró).

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111979>

0378-7788/© 2022 The Author(s). Published by Elsevier B.V.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

pean Union (EU), the increase of energy efficiency in the building stock and the limitation of demand levels for new construction have been promoted [4,5], giving rise to the concept of near zero energy consumption buildings nZEB [6–8]. Likewise, another important premise stipulated by the EU is the progressive decarbonization of the sector [9], an aspect in which the Heat Pump (HP) has acquired great relevance.

The EU has published Directives expressly citing the use of HP in buildings [4,10], which demonstrates its clear support for this technology. The interest in the HP lies in its capacity to harness thermal energy contained in three types of energy sources classified as renewable: aerothermal, geothermal and hydrothermal [10,11].

The low consumption of nZEB has increased interest in the use of air source heat pumps (ASHP) for heating and DHW systems, as long as it is compatible with the severity of the local climate. Furthermore, the possibility of supporting such systems with solar energy also increases their performance. There are a great many solutions through combining them with solar thermal (ST), photovoltaic (PV) or hybrid (PV/T) systems. On the basis of the studies carried out over the last decade [12], the average value of the COP of the HP is 2.90 for combinations of ST-ASHP, 3.75 for combinations of PV-ASHP and an intermediate value of 3.03 for PV/T-ASHP combinations.

In the field of energy savings, many authors propose turning façades into active solar elements [13,14]. Double skin façades, glazed or opaque, ventilated or non-ventilated, have become a consolidated architectural solution in widespread use because they facilitate assembly while maintaining high aesthetic quality [15]. They are characterized by their versatility, offering an infinite number of configurations [16], which is why, although they have been investigated over the last three decades, they continue to be the object of development and study [17]. Thus, ventilated double façades are used as elements of solar energy gain, both at the solar thermal level by designing them as solar thermal collectors [18], and solar photovoltaic by using photovoltaic elements that can be integrated into the building (BIPV/T) on the exterior layer [19].

The literature shows that the most common and most studied application to date is to integrate the ventilated double façade with the ventilation system [20]. In this way, preheated air is supplied to the ventilation system in winter, or the direction of the airflow is controlled to cool the envelope in summer [21]. A less studied way of using the preheated air in the façade is to use it as an energy source for a heat pump [18,22]. The need to conduct airflow to the heat pump implies that the façade has forced ventilation. The use of BIPV elements in the façade can help to reduce the extra electricity consumption due to this forced ventilation.

Among the few studies carried out on the integration of a forced photovoltaic ventilated double façade with a heat pump, one of the most complete is the study by Siwei Li et al [23]. It proposes the combined electrical and thermal integration of a double BIPV/T façade of the unglazed transpired solar collector (UTC) type to the underfloor heating and ventilation of an area of an office building subsequently analysed by simulation. The air heating in the façade is determined using a model developed in a previous study [24,25]. It is a very detailed study, although very specific to the proposed façade design and case study. Another study in the same direction is that developed by K. Martin et al [26], in which the façade uses an exterior layer of photovoltaic glazing and the simulation of a residential building is taken as a case study. It is an interesting and practical proposal with the lack that the façade air heating is based on a non-validated simplified model. In both studies the analysis is based on the balance of energy. However, it is not clear if the potential of the façade to heat air matches the airflow requirements of the heat pump.

Photovoltaic forced ventilated façades (PV-FVF) are unique solutions that are highly dependent on the design and operation with which they have been defined in the project. Thus, the models for predicting the behaviour of PV-FVF turn out to be very specific for each façade design and therefore limited in their ability to be applied to other cases [19,27–29]. Regarding the model type used, concentrated parameter models tend to be selected for their ability to represent constructive solutions in a simplified way, with the accuracy of analytical models and less computational effort [25,30].

Models are usually validated against experimental data from generic in-situ monitoring [31,32], but the most representative data comes from detailed tests lasting long enough to capture significant variability in operating conditions [33]. The reference data for validation can also come from CFD simulations or a combination of these with experimental data, further narrowing the scope of the model [34,35]. Likewise, the study sometimes focuses on the solar thermal and electrical energy gain of the façade, accounting for it directly in the energy balances of the building. Doing this there is a risk that the technical limitations do not be verified. By doing this there is a risk that the technical limitations are not verified.

Ioannidis et al [36] carried out a study that attempts to cover all the aspects mentioned above, developing a general-purpose parametric mathematical model that can be used as an evaluation tool in the design of a double photovoltaic ventilated façade. It is a comprehensive model that contemplates various operating scenarios, and one of them is precisely the coupling of preheated air to a heat pump. However, although it draws on experimental data from a previous study [37], it does not go into the experimental validation or the building model.

Marta J. N. et al [38] proposed using the building's structural thermal capacity as a means to store heat in winter. This concept is called "building as battery" (BaB). To do so, they proposed varying the predefined interior temperature setting to between 23 °C and 26 °C during a period of thermal charging of two to four hours, depending on the occupation and user profile. The study was limited to a mild winter climate in which they determined an accumulation efficiency of between 40% and 80% for the three premises, from low insulation to passive house. This efficiency is understood as that fraction of the extra energy provided in the charging cycle which is finally taken advantage of for heating the building. However, the net reduction in annual consumption was not established in their study. Although the said study was carried out using a direct, electric radiator system, the authors postulated that this strategy could be one of the mechanisms to be used to increase the penetration of locally produced renewable photovoltaic energy (PV RE) in the energy mix of the residential sector, as it could be applied to PV RE powered heat pump. Furthermore, this way of functioning gives rise to energetically flexible residential buildings [39], a concept that favours the optimisation of the energy network itself [40].

The methodology employed in this present work involved three stages carried out at a high level of reliability: testing, modelling and building energy simulation.

The first stage corresponds to the experimental thermal characterization of a sample of the PV-FVF solution under real outdoor conditions. The test method employed was the one established by the PASLINK network [41] using the EGUZKI test cell [42] of the Building Quality Control Laboratory of the Basque Government (LCCE) [43]. The thermal characterization was executed in both winter and summer conditions.

The second stage of the study was to obtain an RC numerical model of the façade whose derivation process used the concentrated parameter modelling technique (RC-model) established by the PASLINK method. The singularity of these façade solutions

means that the models developed correspond to its specific design and operating conditions. The PV-FVF analysed is unique in that it modulates the level of forced airflow through the chamber at two levels: low flow of 10 l/s and high flow of 200 l/s. The high flow operation is defined as “gain mode” operation and occurs when the outside surface temperature on the photovoltaic layer is registered at 5 °C higher than the outside ambient temperature. Otherwise, the extraction flow rate is set to low flow. The differences observed during the experimental stage for the surface thermal behaviour of the air gap in the different operating modes of the façade also reinforced the need for an adapted mathematical model that will represent them in detail.

Finally, the third stage consisted of a building-level analysis by simulating a case study using DesignBuilder energy simulation software. In this stage, it was crucial to be able to integrate the predicted heating for the airflow in the PV-FVF at each time step in the simulation. Lucchino et al [44] recommend always having experimental data when incorporating a Double Façade element in a building energy simulation tool (BES) in order to validate the effect of this element on the energy performance of the whole building. In this sense, the simulation of the case study building presented in this work is supported by the detailed validation process realized during the previous stage of the thermal model development.

The present study applies the concept of solar support using an ASHP with BIPV/T integrated into the façade and the concept of thermal accumulation using the BaB strategy to make the building more flexible energetically. The following contributions are made:

- On the basis of the BaB concept [38], and the operating characteristics of the PV-FVF, we propose the “Adaptive Indoor Temperature Setpoint Strategy” called $T_{adaptive}$ as the mode of operation for the PV-FVF and ASHP hybridisation. The building scale analysis carried out in the present study constitutes a continuation of the potentialities proposed by [38]. However, unlike that study, we quantitatively determine the net annual reduction in consumption for the model building instead of the accumulation efficiency, and we do so for the system and the complete building in a more severe winter climate.
- We demonstrate the impact that the control strategy based on a $T_{adaptive}$ has, doubling the reduction in consumption of the ASHP obtained in a previous study of the PV-FVF [26]. Although the study case is not the same, the improvement in the COP of the ASHP is comparable to that between the previous and the present studies if the $T_{adaptive}$ strategy is not applied.
- In order to incorporate the effect of the thermal accumulation, unlike the analysis carried out in the abovementioned prior study of the PV-FVF [26], it was necessary to get a detailed numerical RC model from all the information obtained in the PASLINK test of the PV-FVF and with a high level of accuracy.
- The steps followed in the methodology of the present study themselves constitute an analysis method of similar solutions when determining the impact on energy consumption at a building level.

2. Experimental setup

The experimental characterisation was carried out using a test cell called “EGUZKI”, implemented according to the specifications of the PASLINK method, situated in the Quality Control Laboratory of the Basque Government Building (LCCE) in the city of Vitoria-Gasteiz in northern Spain. The PASLINK test method outside allowed us to analyse the thermal response of a building element in exterior conditions, despite the high number of factors influencing the sample in such conditions. To do so, the test cell was interiorly heated with a succession of high and low power periods. In this way, the interior conditions were not directly dependent on

the exterior conditions, uncoupling the response of the sample from the response of the cell itself.

Similarly, this test method also had statistical and modelling tools based on grey box techniques. These techniques, on the basis of error minimisation criteria, adjust a representative RC model of the sample on the basis of the data registered during the test. Further details of the cell and the test technique can be found in García-Gáfaró et al [45].

Fig. 1 shows the PV-FVF sample tested in the EGUZKI cell, with a diagram of its component layers. The base wall used was a 15.5 cm thick concrete block masonry, coated with 1.5 cm of plaster on the inside and rendered with 1.5 cm of cement mortar on the outside. The exterior insulating layer consists of 5 cm thick mineral wool panels with a thermal conductivity of 0.036 W/m·K, integrated with the structural load-bearing parts of the 0.65 cm thick opaque photovoltaic glass layer. The air gap is 10 cm thick. The sample has a thermal transmittance of 0.51 W/m²·K according to ISO 6946 [46]. Fig. 1 also shows the ducts for the extraction of the air from the cavity with a design adapted so as not to cast a shadow on the sample. The exterior layer was composed of six opaque photovoltaic glasses with dimensions of 0.61 × 1.22 m. These are amorphous silicon (a-Si) photovoltaic elements inserted between glass plates. Their efficiency is much lower than that of polycrystalline silicon, but in exchange they are much lower cost elements and enable greater heat gain. It is a technology in continuous development, also available in semi-transparent formats, with the possibility of using tinted glass in various colours and shapes.

The instrumentation for monitoring the sample consisted of the sensors shown in Fig. 2 whose specifications are also listed in Appendix A (Table A.1). Four heights were defined in the central axis of the sample as a reference to locate sensors in each of the six layers: 0.6; 1.2; 1.8 and 2.4 m. Thus, there are four surface temperature sensors in layers 1, 2, and 3; four temperature sensors and four velocity sensors in the middle of the air chamber (layer 4). For the photovoltaic layer, three surface sensors were installed on the inner side in the middle of the panel and one on the outer side. As a contrast signal, seven heat flow meters were installed on each side of the brickwork (layers 1 and 2) and on the inside of the PV (layer 5). In the exhaust fan duct, the volumetric flow and its temperature were monitored.

Fig. 3 shows the control of the extracted airflow from the ventilated chamber during the winter test, which is what gives it the active character: the forced airflow rate changes from a base and always activated value of 10 l/s, to a high, temporary value of 200 l/s when the façade has a net thermal gain. Moments of net heat gain have been defined as those in which the temperature of the outer surface of the photovoltaic layer is at least 5 °C higher than the outside air temperature. This pre-heated airflow can be used as support for a ASHP. The Heat Pump is responsible for supplying the heating energy demanded by the building at all times, and it must be able to do so independently of what happens with the PV-FVF. The great difference is that, when the PV-FVF airflow extraction is running at a high velocity, the Heat Pump will function with greater efficiency. On cloudy days or at night, the PV-FVF functions on a low flow basis of 10 l/s. In such periods, the Heat Pump uses exterior air mixed with the said small flow coming from the PV-FVF.

The PV generation has been considered. Its intensity, voltage and power were measured and then instantaneously dissipated through an inverter and a small array of electrical resistances, mainly made up of electric light bulbs. Determining the electrical generation has allowed to establish the mean performance of the photovoltaic glass, which was established at 5%.

The energetic behaviour of the PV-FVF recorded by the experimental results showed a number of qualities of interest for the purpose of the next stages of this study, which can be summarized in the following items:

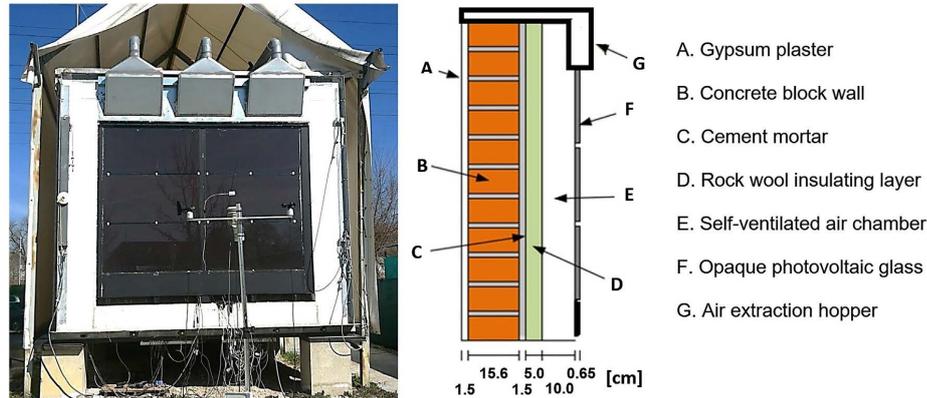


Fig. 1. PV-FVF sample tested and schematic of its section.

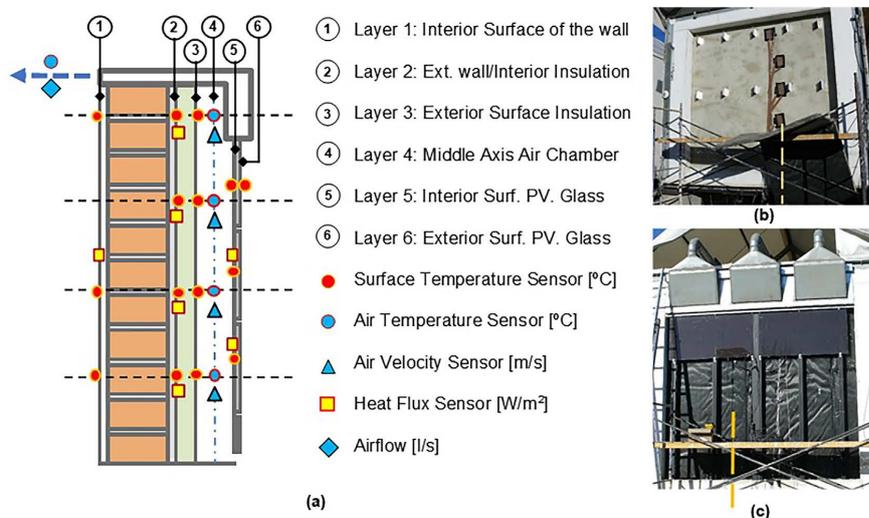


Fig. 2. a) Instrumentation arranged in sample section, at four heights. b) Sensors aligned on the outer face of wall - Layer 2. c) Installation of sensors in chamber.

- Inducing airflow through the ventilated chamber causes the PV-FVF to act as a heating tunnel, which has been shown to be effective for the chosen geometry and volumetric flow in the PV-FVF. The rise in the airflow temperature, which was associated with an energy gain in the form of thermal energy, was proof of this. Thus, the solution demonstrated its potential as a heat source.
- Under net heat gain conditions, the airflow (set at 200 l/s) is fully developed, both thermally and hydrodynamically, at half the height of the 2.7 m of the sample. This quality is an important criterion for some of the assumptions adopted for the building-level simulation.
- The condition of the warmer of the two surfaces of the air gap alternate throughout the day. The outer surface of the insulating layer is warmer during nocturnal periods, while the inner

face of the PV layer is warmer during daytime periods. This influences the convective processes of the airflow, because the convective heat transfer coefficient of the warmer surface is higher.

- The highest solar energy uptake in the PV-FVF generally occurs when the building heating demand is lowest. This mismatch between solar energy uptake and demand is common in solar energy technologies. Therefore, the energy facility that uses the PV-FVF to support the heat pump for the heating requires a strategy that optimizes it. The PV-FVF demonstrated an important thermal energy gain potential in this experimental stage, the transference of the largest amount possible of this energy to the building being the objective of the said strategy. The building-scale analysis section describes how this challenge was addressed.

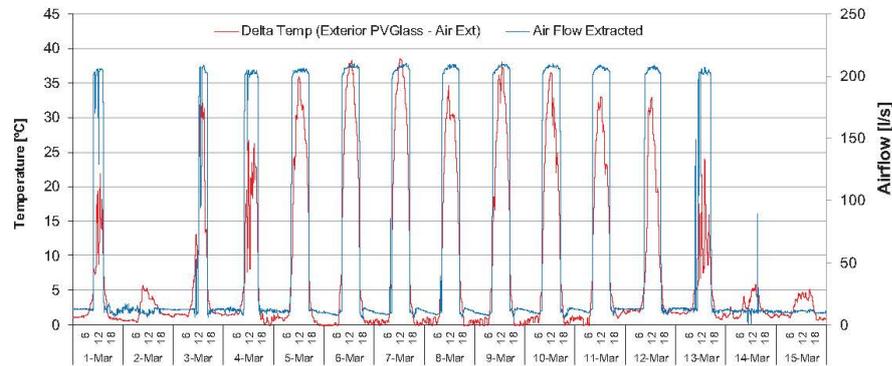


Fig. 3. High and low levels of extracted airflow in function to the difference of temperature between the exterior PV layer surface and the exterior ambient air in the winter period.

In addition to the temperature and the flow of heat and air measured in the sample, the incident solar radiation and the ambient temperature were also considered relevant for obtaining the model of concentrated RC parameters using the PASLINK method.

3. Thermal model for the PV-FVF.

3.1. LORD and numeric RC model of the PV-FVF

The objective at this stage was to obtain a mathematical model to predict the rise in temperature of the air extracted from the PV-FVF in any given place, using the indoor temperature, the outdoor temperature and the incident vertical global radiation as input data.

The development of the model is an intermediate step towards achieving the final goal of this study. That is why it is a very specific model for this façade. It is not meant to be universally applicable to any PV-FVF. However, we prove the capacity for a “grey box” type model [47,48] to reproduce the complex thermal balance that occurs in a PV-FVF in a simplified but reliable way.

The developed model is able to reproduce the two modes of operation of the PV-FVF, self-regulating the level of airflow between the values of 10 l/s or 200 l/s. Another quality is its ability to vary the convective coefficients of heat transfer in the air chamber, depending on the operating conditions: high airflow, low airflow, winter or summer.

The development of the model can be summarized as follows: First, an iterative process was applied, using the concentrated parameter modelling techniques developed by the PASLINK network (parameter identification technique). Second, this solution of the RC model was then converted to a numerical model, which allowed the PV-FVF to be calculated for each time step. Finally, this numerical model was validated with data from all monitored layers for both summer and winter conditions. Therefore, the validation process used all the extensive data available from the test.

The first step, the system identification, is the technique used by the PASLINK methodology to obtain a model with physical interpretation using statistical tools [49]. The starting point is a grey-box RC concentrated parameter model, which connects a set of time-continuous ordinary differential equations with a set of measurement data obtained at discrete time instants. The tool used to fit the RC model was called LORD (Logical R-Determination) [50] developed by the PASLINK methodology itself. A detailed description of the mathematical development underlying the system identification

technique used by LORD and other tools can be found in Bloem [51] and in summary form in García-Gáfaró et al. [42], while examples and the criteria for applying RC models in buildings can be found in Bacher et al. [52].

The model thus obtained is called the “LORD model” and it is the destination point of all PASLINK tests. This is because the thermal transmittance and the solar gain of the test sample are determined by it. These two magnitudes are the principal starting variables for a PASLINK characterisation. For the PV-FVF sample tested in the present study, the LORD model shown in Fig. 4 was obtained.

The part of the RC model representing the test room was previously determined by an optimization study carried out by Escudero [53], based on the experimental data obtained in the calibration test of the EGUZKI test cell [45]. In this part of the LORD model, the subscript HFS refers to the walls having HFS-Tiles, while the temperature node T_i refers to the air volume inside the test room.

The air chamber is represented by a second order model, in which two heat exchange paths were considered: a convective one between the walls enclosing the chamber (nodes T_3 and T_5) and the air (node T_4), and another heat exchange path by radiation between surfaces 3 and 5. The heating phenomenon of the air column that occurs in the ventilated chamber is represented unidimensionally. To do so, we take the final temperature at which the air is extracted from the chamber as the node temperature, while the heat flow that achieves the said heat gain is also accounted for. This heat is the total thermal energy gained by the air flow as it passes through the air chamber, it is the so-called \dot{Q}_{gain} and it is determined according to the equation (1).

$$\dot{Q}_{gain} = \dot{v} \cdot \delta_{air} \cdot c_{p,air} \cdot \Delta T_{air} [W] \quad (1)$$

where \dot{Q}_{gain} [W] is the instantaneous heat gain power; \dot{v} [m³/s] is the airflow rate; δ_{air} [kg/m³] the air density; $c_{p,air}$ [J/kg·K] the specific heat of the air and ΔT_{air} [K] the instantaneous temperature difference between the air extracted from the façade and the outdoor environment. As mentioned, the reference temperature to determine this jump is the value measured at the top of the façade.

Equation (2) determines the global solar radiation incident on the sample \dot{G}_v [W] as the product of the vertical global solar irradiation G_v [W/m²] multiplied by the sample surface with photovoltaic glass A_{pv} [m²]. The area A_{pv} has a constant value of 6.42 m².

$$\dot{G}_v = G_v \cdot A_{pv} [W] \quad (2)$$

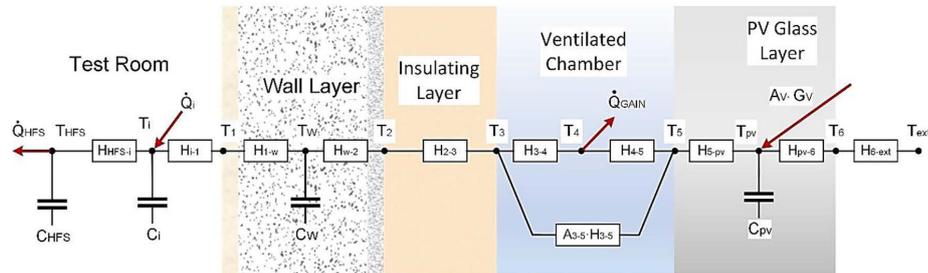


Fig. 4. LORD version of the RC model of the tested façade solution PV-FVFF to reproduce the test data.

The lower branch that directly connects the nodes of the temperatures T_3 and T_5 corresponds to a heat exchange by radiation between two large parallel plates, given by equation (3), in which; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$ is the Stefan-Boltzman constant; T_3 and T_5 are the temperatures in K of the corresponding surfaces 3 and 5; ϵ_3 and ϵ_5 are the adimensional emissivity of the corresponding surfaces 3 and 5, and $A_{fac} [m^2]$ is the area of the sample. Since the values of the emissivity are not known with any accuracy, they are defined using an estimated value of $\epsilon_3^* = \epsilon_5^* = 0.8$ and LORD is instructed to make the adjustment by applying the aperture factor A_{3-5} , giving rise to the expression indicated in equation (4).

$$\dot{Q}_{3-5} = \frac{\sigma(T_5^4 - T_3^4)}{\frac{1}{\epsilon_5} + \frac{1}{\epsilon_3} - 1} A_{fac} \cong \frac{4\sigma T_{3-5}^{-3}}{\frac{1}{\epsilon_5} + \frac{1}{\epsilon_3} - 1} (T_5 - T_3) A_{fac} [W] \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{3-5} = A_{3-5} \cdot \frac{4\sigma T_{3-5}^{-3}}{\frac{1}{\epsilon_5} + \frac{1}{\epsilon_3} - 1} \cdot (T_5 - T_3) A_{fac} = A_{3-5} \cdot H_{3-5} \cdot (T_5 - T_3) A_{fac} [W]$$

A second-degree model makes it possible to reproduce the photoelectric phenomenon of the photovoltaic cells for the photovoltaic glass layer. This phenomenon presents a variable response to the intensity of the incident radiation and involves an exothermic process, functioning as an internal thermal source. After testing a number of possible LORD modelling configurations, the best fit was obtained by defining the incident radiation as a heat gain at the intermediate node T_{pv} , corrected by the A_V aperture factor. In this way the $A_V \cdot G_V$ product intrinsically represents the entirety of the thermal and photo electrical phenomena at this layer. One element is the heat input from solar radiation, which depends on numerous factors such as the radiative properties of reflection and absorption of the glass itself. Another is the residual heat from the photoelectric generation at the photovoltaic cells.

Table 1 registers the values determined by the LORD adjustment for the model of Fig. 4. Note that the A_V aperture parameter

adopts a value greater than unity. Because this takes into account the solar gain and heat waste of the photoelectric process, both of which are dependent on the incident radiation intensity, it is reasonable to obtain this greater value. It is the consequence of connecting solar radiation to the T_{pv} indoor node.

Having reached this point, we have the model that best reproduces the experimental data and, in a normal PASLINK test, this would be the end of the process. However, for the objective of this study, we are looking for a model that will allow us to predict the heating in the chamber with easily available input data for any location: exterior temperature, exterior radiation and the interior setpoint temperature. So the next step is to transform the RC model resolved by LORD into the numeric model indicated in Fig. 5.

This numeric model allows a calculation to be made in transitory regime of the solution for the façade. On applying the technique of numeric methods for the interior wall and the layer of insulation, as well as making assessments of the heat flow in the rest of the nodes, a set of equations is obtained that resolve the temperatures of the façade and which can be expressed by means of the matrix equation shown in equation (5)

$$\{T_{i+1}\} = [A]\{T_i\} + [B]\{U_{i+1}\} \quad (5)$$

where $\{T_{i+1}\}$ is the state vector of the temperatures of all the nodes of the model for the instant $i + 1$; $\{T_i\}$ is the state vector of the temperatures of all the nodes of the model for the instant i ; $\{U_{i+1}\}$ is the vector formed by the supply functions, i.e., the model's input data: interior temperature, exterior temperature and vertical incident radiation for the instant $i + 1$. The matrices of the coefficients $[A]$ and $[B]$ are derived from the heat balance expressions of the different nodes. The detailed development of this equation can be seen in Appendix B, in the equations (B.1) to (B.9). The step between time instants has been defined as $\Delta t = 10min$.

Table 1
LORD Solution values of the RC model parameters of the tested PV-FVFF façade.

Parameter	Value	Parameter	Value
$H_{1-w} [W/m^2 \cdot K]$	5.25	$H_{3-5} [W/m^2 \cdot K]$	$f(T_3, T_5) \in [3.4, 5.3]$
$H_{w-2} [W/m^2 \cdot K]$	5.25	$H_{3-pv} [W/m^2 \cdot K]$	270.7
$C_w [kJ/(kg \cdot m^2 \cdot K)]$	216.5	$H_{pv-6} [W/m^2 \cdot K]$	270.7
$H_{2-3} [W/m^2 \cdot K]$	0.731	$C_{pv} [kJ/(kg \cdot m^2 \cdot K)]$	17.2
$H_{3-4} [W/m^2 \cdot K]$	High airflow: 21.3 Low airflow: 2.2	$H_{6-ext} [W/m^2 \cdot K]$	28.9
$H_{4-5} [W/m^2 \cdot K]$	High airflow: 32.6 Low airflow: 2.9	$A_V [m^2]$	2.08
$A_{3-5} [-]$	1.076		

C. García-Gáfaró, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal et al.

Energy & Buildings 261 (2022) 111979

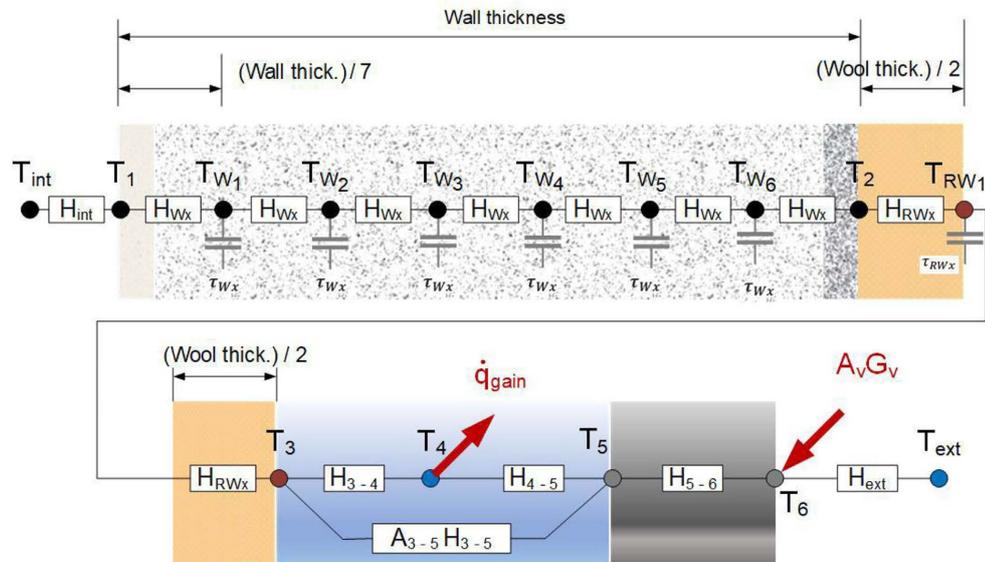


Fig. 5. Numeric version of RC model of the façade solution PV-FVF for general use.

3.2. Model validation

The solution obtained for the numeric RC model is tested by taking the indoor surface temperature T_i , the outdoor ambient temperature T_{EXT} , and the vertical incident solar radiation G_v as input with both winter and summer test cell data.

The comparison between the values calculated by the numeric model and those measured experimentally during the winter period for the temperatures T_2 , T_3 , T_5 and T_6 can be seen in Fig. 6. As shown, the model can adjust the values of all the layers simultaneously. The error indicated corresponds to the difference between the measured and calculated values, the mean error being the average of all differences in absolute value. The comparison between the experimentally measured values and those calculated by the model for the airflow in the ventilated chamber are shown in Fig. 7. Both the evolution of the air temperature in the chamber T_4 , and the heat gain power \dot{q}_{gain} associated with this temperature are shown in the graphic. The model self-regulates the airflow rate in the façade according to the Boltzmann sigmoid adjustment described in Appendix B, as well as automatically alternates the values of the convective conductances in the chamber according to the airflow rate level.

The results obtained demonstrate that the model is fully capable of reproducing the heat transfer processes occurring in the PV-FVF façade solution tested. This modelling capability works for both sunny and night or cloudy periods. One key element of matching the model with the experimental data was the change of the convection coefficient value depending on which surface of the chamber had the higher temperature.

The greatest differences between measured and calculated temperatures occur mostly in the low temperature periods. It is observed that the experimental value is colder than the calculated one in the night periods. For example, in the results of the external surface temperature of the photovoltaic glass sheet T_6 , and the air temperature in the ventilated chamber T_4 . The reason why the model does not manage to better match the data is due to the fact

that experimentally the level of radiant exchange between the façade and the coldest night environment has not been measured, especially on clear nights. This can be improved by including a high sensitivity pyrgometer in the measurement of vertical radiation on the façade. However, this effect was not critical, as the total heat gain calculated for the test period was only 1% less than that obtained experimentally.

The comparison between the numeric RC model and the experimental data for the summer period is shown in Fig. 8 and Fig. 9. The result obtained shows that the model is also able to adequately reproduce the thermal response of the façade in the summer period. The results shown indicate the values largely match, less than 15% for 90% of the values at all nodes. As for the thermal gain, it is observed that the model has underestimated by 12.5% the total energy transferred to the ventilated chamber airflow during the test period.

3.3. The PV-FVF numeric RC model as air chamber temperature predictive model

The numerical model validated with experimental data can then be used to predict the air temperature of a PV-FVF at any location and orientation. For this purpose, it is sufficient to use the interior temperature T_i , and the local climatological data for T_{ext} y G_v . The value for the conductance H_{i-1} can be determined from the standard value defined for an interior thermal resistance established by ISO 6946 [46]. The same can be done for the conductance in the exterior layer H_{6-ext} . The model itself predicts the values of surface temperature in the outer PV layer T_6 . The difference between T_6 and T_{EXT} determines the value of the air velocity in the chamber according to the sigmoid fitting functions described above. On the other hand, the inside temperature can simply be limited to set point values during specific periods of time.

Therefore, the model validated with the experimental data becomes a predictive numeric model that can be used to determine the temperature field of the PV-FVF. It is easily adaptable to any

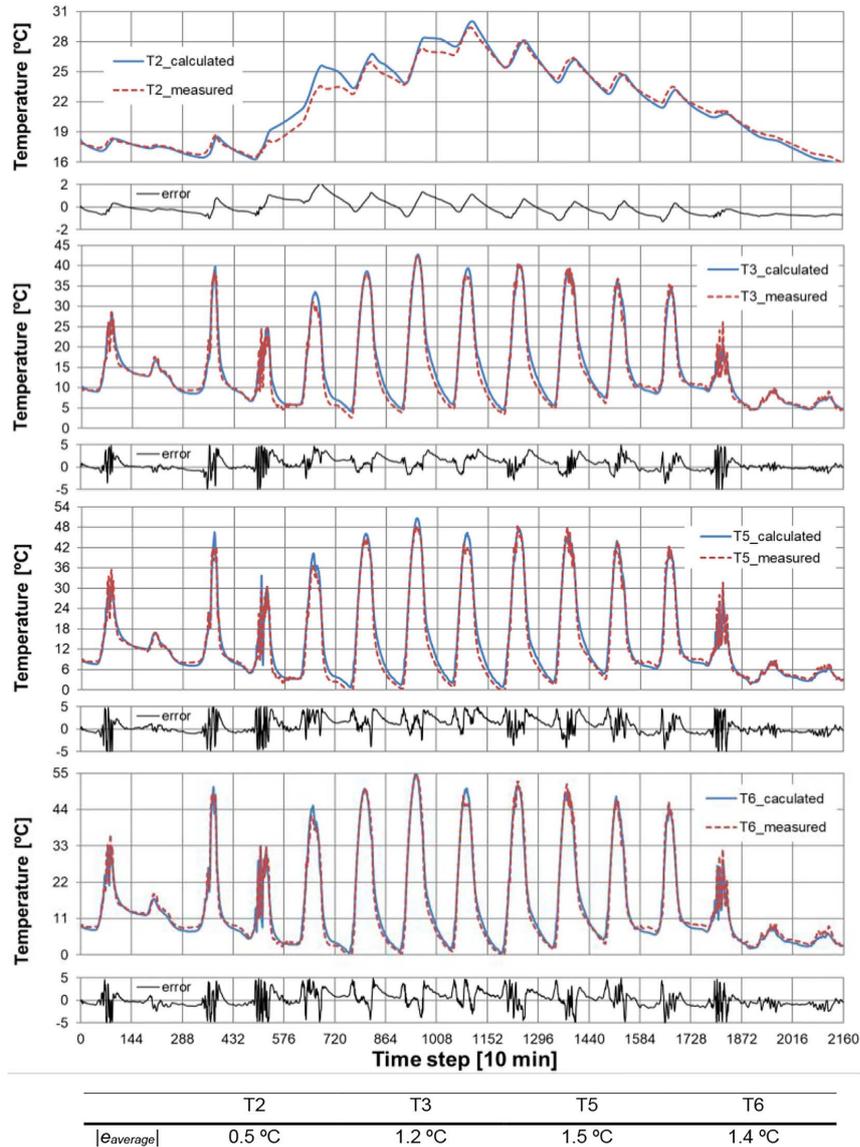


Fig. 6. Comparison of measured and calculated values for temperatures T₂, T₃, T₅ and T₆ for the winter period.

calculation program. The model is applicable to any base wall and insulating layer whose thermal resistance and capacitance values are known, adopting these values in the corresponding model components. On the other hand, aspects such as the thickness of the cavity, type of photovoltaic panel and extraction airflow levels are very specific to this model. Future studies may aim to parameterize some of these variables, based on the methodology applied in this study.

4. Building scale analysis

The analysis of the whole building has allowed us to verify the impact of a variable setting temperature, adapted to the instantaneous working conditions of the hybrid PV-FVF and heat pump system. These instantaneous conditions also depend on the atmospheric conditions, both the incident radiation and the exterior temperature.

C. García-Gáfaró, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal et al.

Energy & Buildings 261 (2022) 111979

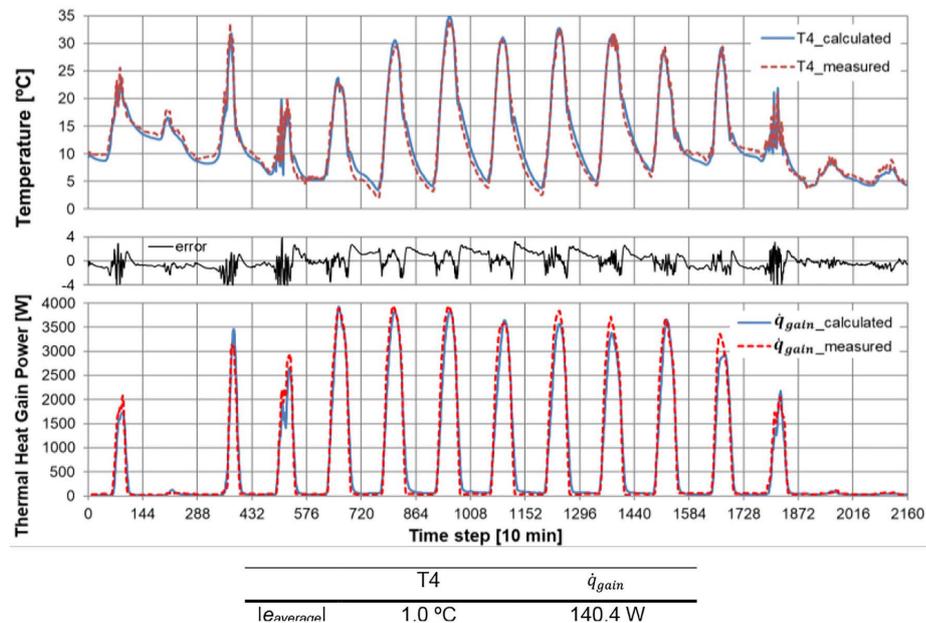


Fig. 7. Comparison of measured and calculated values for T_4 temperature and Q_{GAIN} of the airflow in the ventilated chamber in the winter period.

4.1. Definition of the concept “Adaptive Indoor Temperature Setpoint Strategy”

A key element of any solar energy use is having a complementary accumulation system. Taking into account that the PV-FVF façade has been conceived as a solar thermal gain system and that it transmits this gain to the heating of the building, the possibility of using the building itself as a thermal accumulator has been explored.

Keeping this in mind, the “Adaptive Indoor Temperature Setpoint Strategy” ($T_{adaptive}$) is proposed as one alternative mode of operation for the PV-FVF. The objective is to transfer thermal energy to the building while the façade obtains a higher solar thermal gain, despite the indoor temperature setpoint conditions having been reached.

This $T_{adaptive}$ strategy consists of varying the interior setpoint temperature during the winter according to the conditions of each day with the following criteria: the primary setpoint is one defined by the Spanish Technical Building Code (CTE): 21 °C from 07:00 to 23:00 h / 17 °C from 23:00 to 07:00. If there is a solar gain on the PV-FVF façade (high flow level), the temperature setpoint at that hour is increased to 27 °C; if three consecutive hours with the high setpoint of 27 °C have occurred during the day, the 17 °C setpoint is set at 17:00 h instead of 23:00 h. The latter prevents excessive interior overheating and favours the reduction of the heat pump power consumption. Remember that the PV-FVF functions at a high airflow level when the temperature of the outer surface of the photovoltaic layer is at least 5 °C higher than the outside air temperature, which indicates that there is direct solar gain in the façade.

4.2. Building models and simulation case definitions

The software DesignBuilder®, a recognized BES tool, is used to link an air-to-water heat pump with the heat gain of the PV-FVF,

as well as incorporate the thermal inertia effects of a radiant floor. Linking the heat pump to the PV-FVF means that the temperature of the air exchanging heat with the heat pump evaporator at each time step matches the temperature predicted by the PV-FVF thermal model. Likewise, the amount of air taken by the heat pump evaporator must correspond to the airflow rate extracted from the façade chamber.

As a case study, a free-standing residential building of 54 dwellings located in Madrid (Spain), whose main façades have exact north and south orientations, has been selected.

The thermal characteristics of the envelope, as well as the use and occupancy profiles, have been based on the current Spanish CTE [54], which implies that the building model conforms to nZEB building criteria. Table C. 1 of Appendix C summarizes the thermal properties of the envelope. All floors have the same layout, with nine dwellings per floor, grouped around three stairwells. Six dwellings have three bedrooms and are through-faced with north and south façades, while three dwellings have two bedrooms with only south façades (see Fig. C. 1 in Appendix C).

The energy performance of the building has been simulated for three cases: a reference case without ventilated façade (CTE case); a second case with a south-facing photovoltaic forced ventilated façade and the same reference indoor temperature set point as the reference case (PV-FVF_Tcte case); and a third case with PV-FVF and the “Adaptive Indoor Temperature Setpoint Strategy” used as indoor temperature control (PV-FVF_Tadaptive case). All these cases have been simulated for a whole year using the DesignBuilder® V. 6.1.13 software. For the CTE and PV-FVF_Tcte cases, the indoor temperature setpoint schedule is defined based on the CTE. For the PV-FVF_Tadaptive case, the setpoint control seeks to accumulate energy at times of energy input from the façade, using the $T_{adaptive}$ strategy.

The north, east and west façades of the PV-FVF case are identical to those of the CTE case. On the other hand, the south façade of the PV-FVF case takes the presence of the opaque photovoltaic

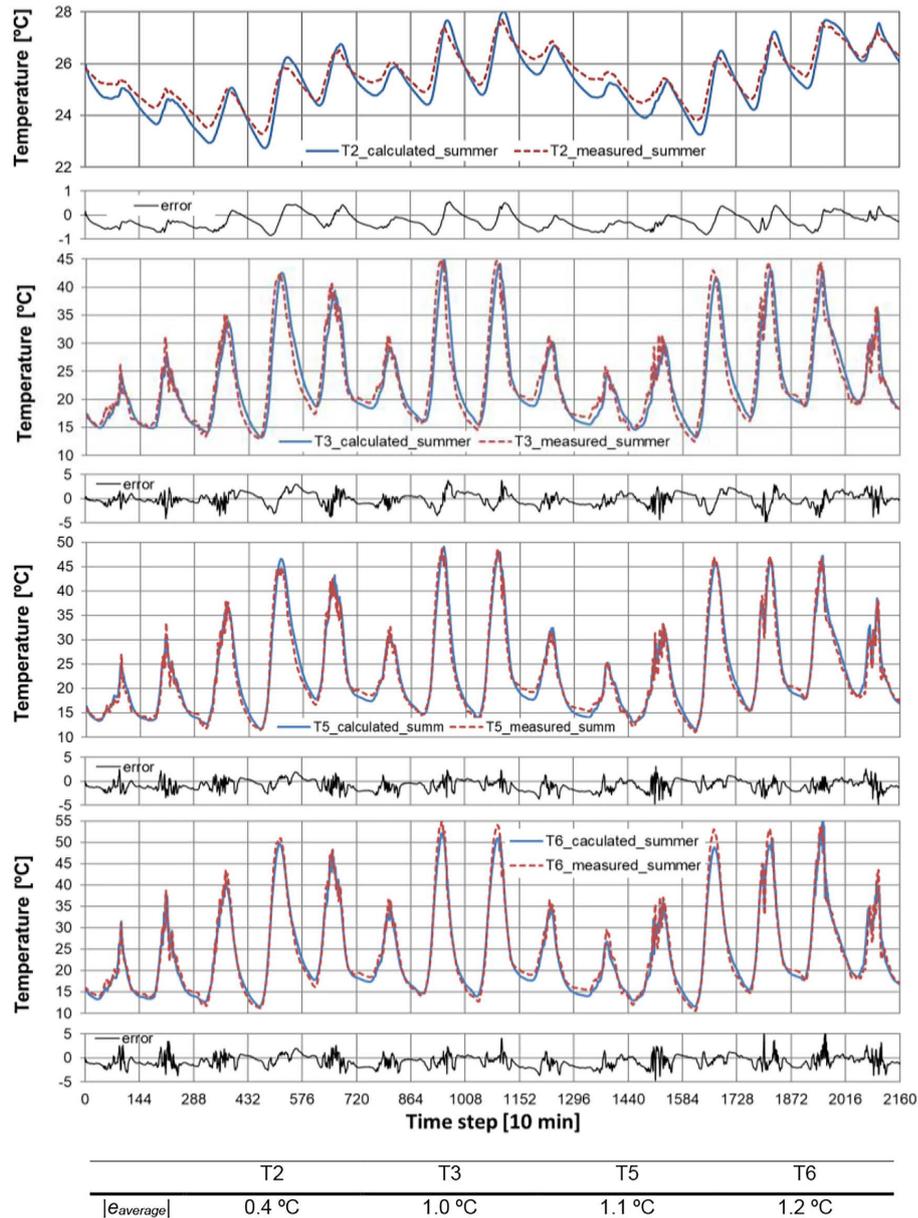


Fig. 8. Comparison of measured and calculated values for temperatures T₂, T₃, T₅ and T₆ for the summer period.

glass panels in the simulation model into account. Fig. 10 shows the aspect of the model with and without PV-FVF.

The construction definition of the south façade wall in the simulated models corresponds to that used in the RC thermal model developed. This model is used to predict the temperature of the PV-FVF chamber as described below.

Photovoltaic glass panels can be manufactured with different dimensions, which allows the maximum possible photovoltaic sur-

face to be defined. For this reason, the photovoltaic surface considered in the model takes advantage of all the vertical sections where it is possible to place a continuous PV-FVF outer layer. To facilitate the calculation process, a continuous strip represents the area equivalent to the sum of the corresponding plates (Fig. 10).

The air conditioning and ventilation installations are identical in both cases. They mainly consist of three systems: 1) Underfloor heating by means of an air-to-water heat pump; 2) Domestic hot

C. García-Gáfaró, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal et al.

Energy & Buildings 261 (2022) 111979

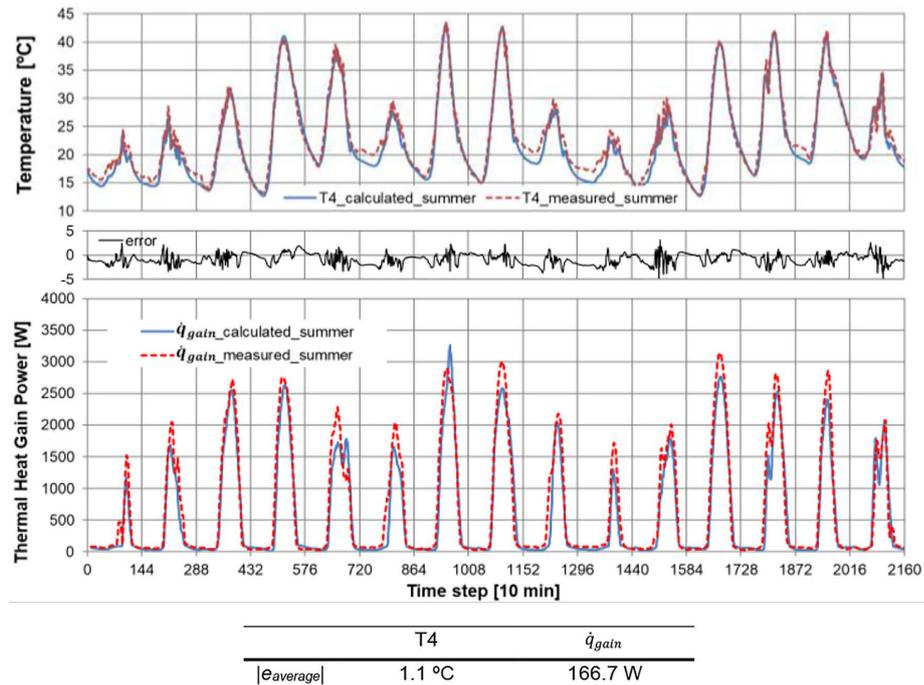


Fig. 9. Comparison of measured and calculated values for T_4 temperature and power thermal gain \dot{q}_{gain} of the airflow in the ventilated chamber in the summer period.



Fig. 10. Appearance of the building model for the two cases: North façade (upper left), south façade of the reference building (upper right) and of the building with PV-FVF (lower).

water by means of a second air-to-water heat pump; 3) Double-flow mechanical ventilation with heat recovery. Fig. 11 shows the schematic representation of the installation used by the DesignBuilder® software.

The nominal characteristics of the two heat pumps declared by the manufacturer correspond to conditions stipulated by EN 14511-3 [55] and are summarized in Table 2. The variation of heat capacity and COP with outdoor temperature can be seen in Fig. C. 2 and Fig. C. 3 of Appendix C.

These variations are incorporated into the respective components of the DesignBuilder for the two Heat Pumps considered in the model using the curve generation tool included in the programme.

As for the way in which the air extracted from the façade is integrated with the component of the Heat Pump of DesignBuilder for the PV-FVF case, it should be said that it is not a question of coupling at a source code level but an external coupling. It is a data exchange between the calculation tool of the numeric model and DesignBuilder in the form of a co-simulation [56,57]. However, instead of the said exchange occurring sequentially or in parallel for each time step, the numeric model first generates a file that predicts the temperature of the chamber for the entire year and DesignBuilder then reads the value of the temperature from this file, assigning it as the air temperature for the evaporator. This is achieved by programming the scripts shown in Fig. C. 4 and Fig. C. 5 of Appendix C in DesignBuilder. The same happens with the adaptive setpoint temperature: starting from a script, a file for the entire winter tells the radiant floor in DesignBuilder the dynamic setpoint temperature. This file has previously been generated from the instants of thermal gain predicted by the numeric model.

Double-flow ventilation with heat recovery uses the default component of the program, with a recovery efficiency of 70%.

4.3. Results and improvement effects due to PV-FVF

4.3.1. PV-FVF air chamber temperature prediction

For the reference case, the indoor temperature set point in winter is based on the Spanish CTE, and consists of 21 °C from 7:00 to 23:00 h and 17 °C for the remaining time. In summer the indoor temperature oscillates freely. The heat gains due to occupancy

C. García-Gáfaró, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal et al.

Energy & Buildings 261 (2022) 111979

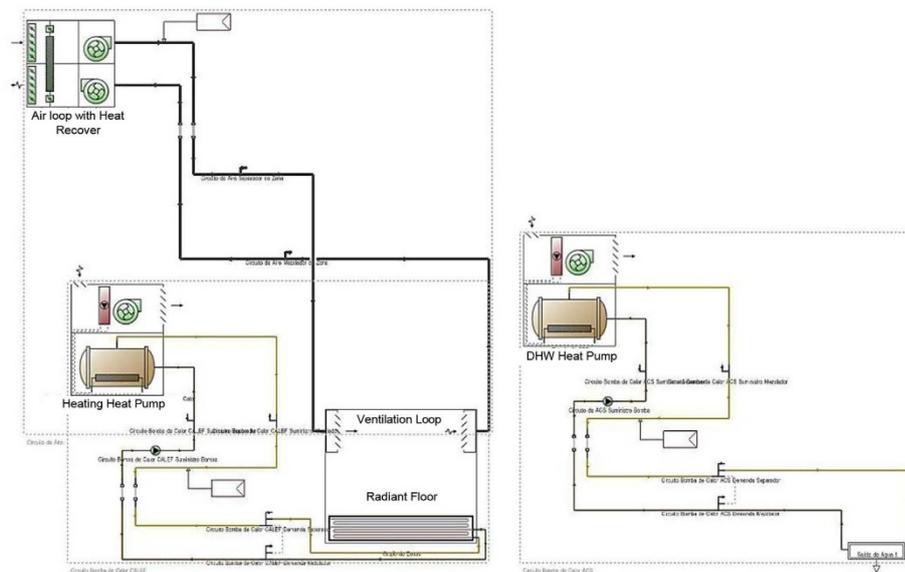


Fig. 11. Diagram of the heating, ventilation and DHW installations of the models.

Table 2
Heat pump specifications defined for the building model.

Heating Heat Pump			DHW Heat Pump		
Reference	Heating Capacity	SCOP	Reference	Heating Capacity	SCOP
Carrier, 30RQS	117 kW	3.06	Carrier, 61AF_045_LR_2015	43.8 kW	3.56

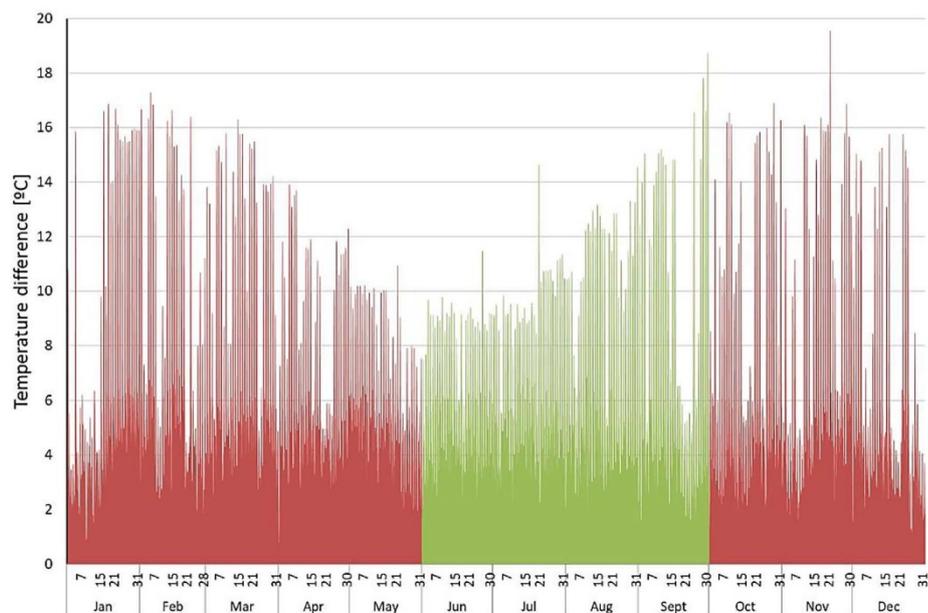


Fig. 12. Instantaneous temperature difference between the air chamber and outside air [°C]

C. García-Gáfaró, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal et al.

Energy & Buildings 261 (2022) 111979

and use are also based on what is defined by the CTE. From the simulation of the whole year, the average indoor temperature of the building is determined every ten minutes.

The thermal model of the PV-FVF façade can be implemented once the reference case has been simulated. This model determines the air temperature as it passes through the PV-FVF chamber throughout the entire year, using as input data ten-minute values of the CTE indoor average setpoint temperature, the vertical incident solar radiation on the south façade, and the outdoor site temperature. Fig. 12 shows the instantaneous rise in chamber temperature determined for the entire year. The winter rise is used

as preheated air for the heating and DHW heat pump condensers, while the summer rise is used only for the DHW heat pump.

4.3.2. Indoor temperature setpoint in reference case vs. PV-FVF_Tadaptive case

Fig. 13 shows the effect of the temperature setpoint definition in the reference building. It shows a January day for all the dwellings located at the east end of the building, on the first and second floors, which are the most energy demanding due to their orientation and façade surface. As expected, dwellings on the first floor over non-habitable spaces and those on the highest floor are found

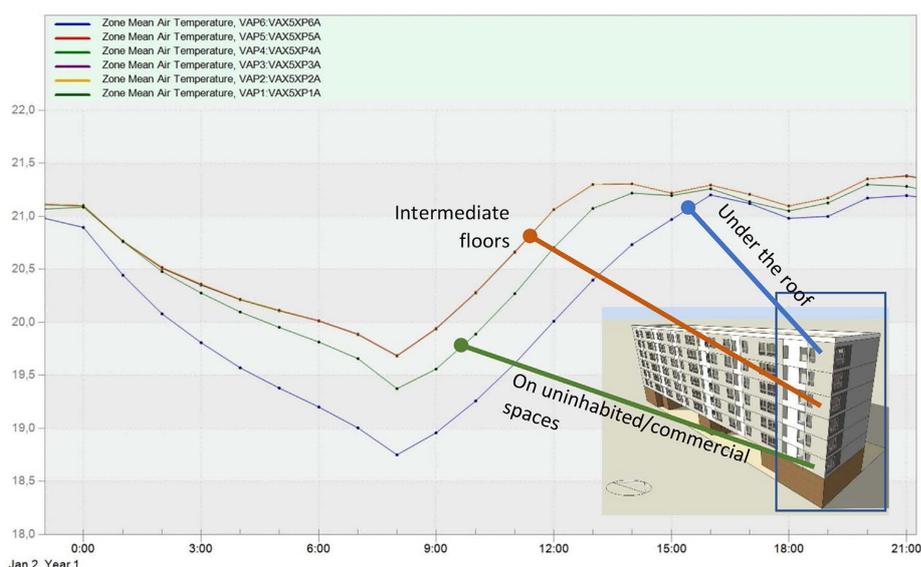


Fig. 13. Hourly value of indoor temperature in dwellings on the east end.

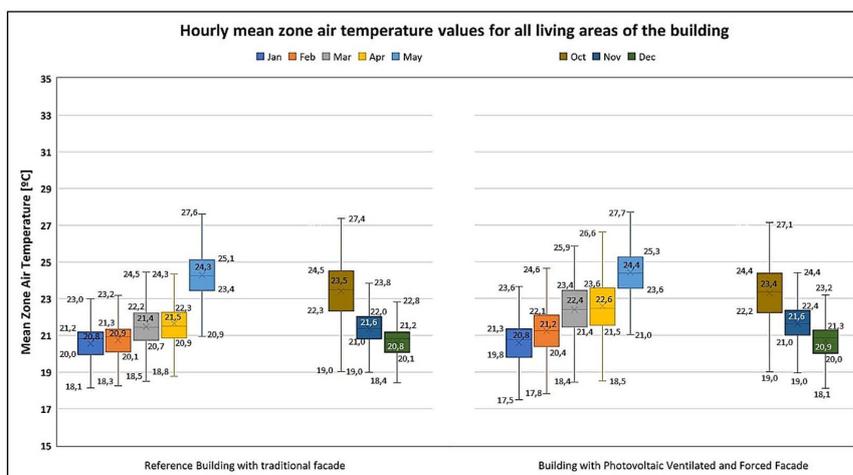


Fig. 14. Comparison of the hourly indoor temperature values for the two cases.

C. García-Gáfaró, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal et al.

Energy & Buildings 261 (2022) 111979

to be more unfavourable than intermediate dwellings. The inertial effect of the underfloor heating can be seen, causing a temperature drop of less than 1.5 °C at night. On the other hand, it takes approximately five hours during the day to reach the set point in the intermediate dwellings.

The setpoint suggested by the CTE is clearly designed for less inertial systems. A more specific control would be required for the model analysed, even defined by floors and depending on outdoor conditions. However, the CTE setpoint was maintained because it is the official reference and allows the dwelling to remain close to the thermal comfort value of 20 °C most of the time during the day.

Before assessing the effects of the PV-FVFF on the building's energy consumption, the interior temperature conditions are compared, fundamentally those of the CTE vs PV-FVFF_Tadaptive cases. In the PV-FVFF_CTE case, as it has the same setpoint as the refer-

ence case, an intermediate situation occurs. Fig. 14 shows the statistical comparison of all the hourly indoor temperature values for all the conditioned spaces during the simulation year. As can be seen in the figure, the average temperature levels during the heating season are comparable, though slightly higher in March and April.

4.3.3. Improving system efficiency and reducing energy consumption due to the $T_{adaptive}$ strategy

The indoor thermal conditions obtained for the three cases are shown to be of the same order for most of the heating season. That indicates that the models produce similar building thermal behaviour, and the differences in heating and DHW energy consumption can therefore be considered a net effect of the use of the PV-FVFF façade.

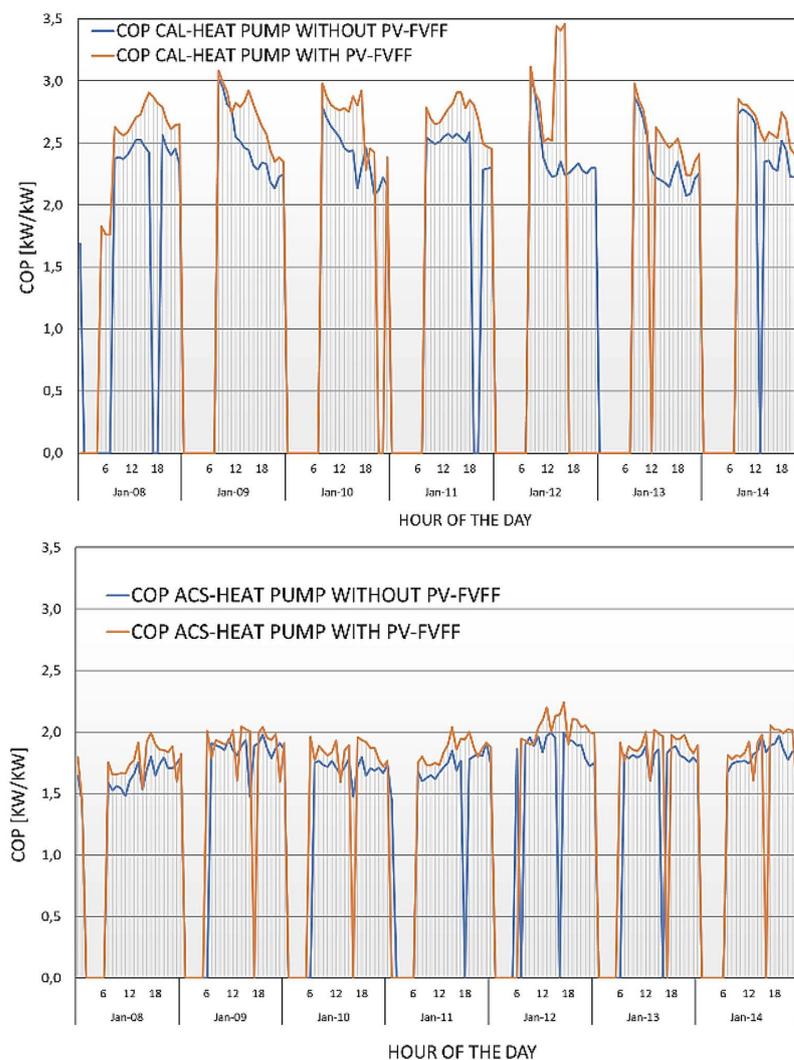


Fig. 15. COPs of the Heating and DHW Heat Pumps – 2nd week - January.

C. García-Gáfaró, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal et al.

Energy & Buildings 261 (2022) 111979

The heat pump calculator component of EnergyPlus® shows the instantaneous values of electrical consumption and heat transfer in the condenser. Consequently, the instant COP value can be determined for the two heat pumps of the building system. The use of preheated air in the façade implies an increase in the instant COP of the heating and DHW heat pumps. The comparison of the instantaneous value of the COP between the CTE and PV-FVF_Tadaptive cases for a week in January can be seen in Fig. 15. The energy simulation enables the quantification of the benefit obtained with this preheating, as explained below.

The electricity consumption and COP of each heat pump are the energy indicators selected for the comparison between the reference case and the PV-FVF cases, producing the differences shown in Table 3. Likewise, in the PV-FVF cases, there is a reduction in electrical consumption of the DHW pump and electrical generation from the photovoltaic modules. In every instant of photovoltaic generation, an equal or higher electric consumption of the heat pumps is required, as shown in Fig. 16 for the PV-FVF_Tadaptive case. The COP curves of the heat pumps include the consumption of their fans, which conduct a flow equivalent to that extracted from the façade. The small extra consumption due to pressure losses, as well as that of the façade in low flow mode, has not been

accounted for. However, this omission is compensated by the conservative nature of the present analysis in all its stages.

4.4. Discussion

The results of the analysis of the whole building show the impact of the control strategy based on a $T_{adaptive}$ strategy, doubling the reduction in consumption of the ASHP compared to that of the previous study of the PV-FVF [26]. The previous study obtained a reduction in the consumption of the ASHP compressor of 9.8%, while the present study obtained a reduction of 19.9% with the application of the $T_{adaptive}$ strategy.

Although neither study used the same case: (34 houses in Bilbao in the previous study and 54 houses in Madrid for the present study), the improvement in the COP of the pump is comparable: 14.8% in the previous study and 13% in the present one without the $T_{adaptive}$ strategy. In contrast, on using the $T_{adaptive}$ strategy, the improvement in the COP increases to 17.4%.

Note that the reduction in the consumption of the compressor when the $T_{adaptive}$ strategy is not applied is of only 3.1%, much less than that of the Bilbao case analysed in the previous study. Many aspects could be considered as the origin of this difference, such as

Table 3
Main energy indicators of the improvement of system efficiency and reduction of energy consumption.

Parameter	Equipment/Facility	Simulation Cases				
		Reference Building CTE	Building with PV-FVF PV-FVF_CTE Value	% DIF	PV-FVF_Tadaptive Value	% DIF
SCOP[-]	Heating Heat Pump	2.3	2.6	+13.0%	2.7	+17.4%
	DHW Heat Pump	2.0	2.1	+5.0%	2.1	+5.0%
Electric consumption[kWh/year]	Heating Heat Pump	37 500.20	36 330.31	-3.1%	30 022.80	-19.9%
	DHW Heat Pump	32 893.32	31 397.33	-4.5%	31 397.33	-4.5%
PV-FVF Electric Generation[kWh/year]	-	-	5 580.19	-	5 580.19	-
TOTAL(Consumption - Generation)		70.393.52	63 329.86	-11.7%	55 839.94	-20.7%

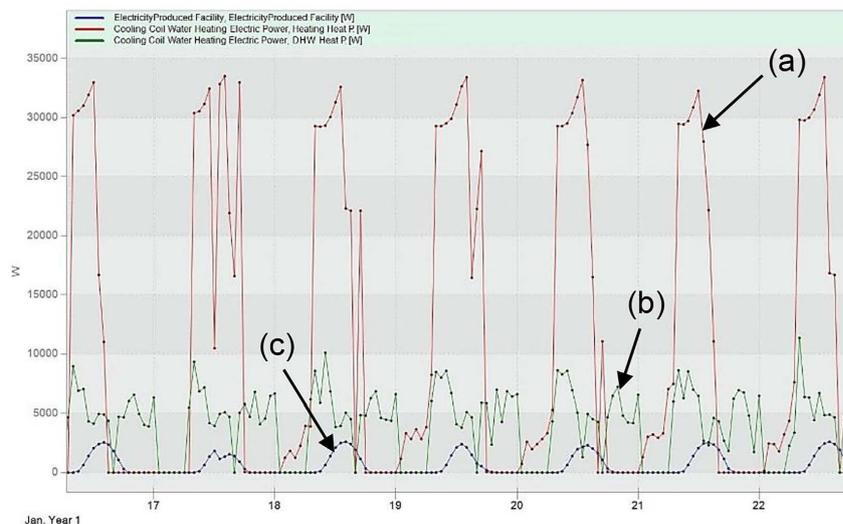


Fig. 16. Electric consumption by Heating (a) and DHW (b) Heat Pumps and in situ electricity generation (c).

the severity of the winter climate itself, the technical differences of the installations, etc. Nevertheless, all such effects are countered by applying the $T_{adaptive}$ strategy.

5. Conclusions

The work presented has constituted a comprehensive study of an active photovoltaic forced ventilated façade (PV-FVF) that has involved three stages:

- The experimental characterization under real conditions.
- The development of a model of the thermal gain of this façade solution, obtained and validated from the experimental data.
- The analysis of the impact of this solution on the energy reduction at the building level by simulation of a case study.

The PV-FVF shows features that give it a unique and innovative character and do not rule out its practical use. The exterior photovoltaic layer is formed by elements known as “photovoltaic glazing” already available in the market at a low cost. Furthermore, it is an active façade in which the forced internal airflow changes from a base value of 20 l/s to a high and occasional value of 200 l/s. The latter mode of operation occurs at times when the façade has a net heat gain. Instances of net heat gain have been defined in this study as those in which the surface of the exterior façade layer is 5 °C higher than the ambient temperature.

The sample tested shows that, in a net heat gain situation, the airflow quickly reaches the developed flow condition, both in temperature and velocity. This implies that in a real façade with a height higher than the 2.7 m of the sample, the temperature gain will be somewhat higher, although not truly different from that obtained in the sample. It also implies that the heat gain predictions made by the model developed, and therefore the energy impact predicted by the simulation are conservative estimates.

The extensive experimental data validates the PV-FVF temperature predictive model for various operating conditions of the façade: daytime, night-time, low extraction flow, high extraction flow, winter and summer.

The integration of the PV-FVF in the building requires a response to two common limiting conditions in active or passive solar energy systems: One is the solar thermal gain occurring at low temperature; the second is the time lag between the periods of highest energy gain and those of highest building demand. For the former, underfloor heating was used as the heating system because it operates at low temperatures. For the latter, a strategy called “Adaptive Indoor Temperature Setpoint” was used. This strategy uses the building itself as a thermal accumulator, increasing the setpoint when the façade has a higher thermal gain and the heat pump works more efficiently (better COP).

For a building scale analysis, a case study of a residential building with 54 dwellings located in Madrid, Spain was chosen. The building is equipped with a heat pump for heating and another for DHW. The results obtained indicate that the integration of PV-FVF and heat pump, combined with an underfloor heating system, reduces heating energy consumption by at least 19.9% and, coupled with the photovoltaic generation of the outer layer, reduces the annual total energy consumption, including DHW, by at least 20.7%.

This study constitutes the basis of potential future projects. For example, the simultaneous use of the air extracted from the façade chamber for the heat pump and for the ventilation of the building. This preheated ventilation airflow could be used to support heat recovery units or directly implemented as recycled air through various stages of filtration. Another is assessing the impact of the use

of different types of photovoltaic glass, air chamber widths and airflow levels on the performance of the PV-FVF.

The experimental thermal characterization of an active photovoltaic forced ventilated façade (PV-FVF) has demonstrated its capacity as a thermal source due to its features as a solar energy collector. The estimation of its energy contribution to a building has shown its viability as heat pump support technology.

In summary, this comprehensive study supports the use of PV-FVF as a technology to be taken into account in the European framework strategy to implement a low-carbon energy model, particularly in the current transition period of 2020–2030.

CRedit authorship contribution statement

C. García-Gáfaró: Conceptualization, Data curation, Methodology, Writing – original draft, Investigation. **C. Escudero-Revilla:** Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Software. **I. Flores-Abascal:** Conceptualization, Validation, Writing – review & editing, Funding acquisition. **J.M. Hidalgo-Betanzos:** Supervision, Writing – review & editing, Project administration, Funding acquisition. **A. Erkoreka-González:** Methodology, Software, Resources, Funding acquisition.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This project has been made possible thanks to the agreement between the Basque Government and the University of the Basque Country UPV/EHU through of the ENEDI research group for the management and development of the Thermal Area of the Buildings Quality Control Laboratory of the Basque Government (AT-LCCE). The authors would like to thank Mr. Germán Campos of Aurea Consulting for his invaluable assistance in defining the infinite number of variables and the programmable scripts for the simulation model in EnergyPlus® through the DesignBuilder® software.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111979>.

References

- [1] The Council of the European Union, “Council Decision 2002/358/CE of 25 April 2002 concerning the approval, on behalf of the European Community, of the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change and the joint fulfilment of commitments thereunder,” *Off. J. Eur. Communities*, vol. L, no. 130, 2002.
- [2] G. Liobikiene, M. Butkus, *The European Union possibilities to achieve targets of Europe 2020 and Paris agreement climate policy*, *Renew. Energy* 106 (2017) 298–309.
- [3] Eurostat, “Shedding light on energy in the EU - A guided tour of energy statistics . 2019 edition,” 2019. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/>.
- [4] D. 2002/91/EC, “DIRECTIVE 2002/91/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2002 on the energy performance of buildings,” pp. 65–71, 2003.
- [5] The European Parliament and the Council of the European Union, “DIRECTIVE 2009/125/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products (recast),” *Off. J. Eur. Union*, vol. L, no. 285, pp. 10–35, 2209.

- [6] European Union, "EPBD recast, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)," *Off. J. Eur. Union*, vol. L, no. 153, pp. 13–35, 2010.
- [7] IPEEC Building Energy Efficiency Taskgroup, "Zero Energy Building Definitions and Policy Activity – An International Review," 2018.
- [8] I. Sartori, A. Napolitano, K. Voss, Net zero energy buildings: A consistent definition framework, *Energy Build.* 48 (May 2012) 220–232.
- [9] The European Parliament and the Council of the European Union, "Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources," *Off. J. Eur. Union*, vol. 2018, no. December, 2018.
- [10] D. 2009/28/EC, "DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL OF 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC," *Off. J. Eur. Union*, pp. 16–62, 2009.
- [11] European Parliament, "Guidelines for Member States on calculating renewable energy from heat pumps from different heat pump technologies pursuant to Article 5 of Directive 2009/28/EC," *Off. J. Eur. Union*, no. December, pp. 27–35, 2013.
- [12] X. Wang et al., A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources, *Renew. Energy* 146 (Feb. 2020) 2472–2487.
- [13] C.M. Lai, S. Hokoi, Solar façades: A review, *Build. Environ.* (2015).
- [14] A. GhaffarianHoseini, Intelligent Facades in Low-Energy Buildings, *Br. J. Environ. Clim. Chang.* 2 (4) (2013) 437–464.
- [15] E. Oesterle, E. Oesterle, *Double-skin façades : integrated planning LK - https://ehu.on.worldcat.org/oclc/932458730*. Munich SE - 207 p. : il: Prestel, 2001.
- [16] X. Loncour, A. Deneyer, M. Blasco, G. Flamant, P. Wouters, "Ventilated Double Skin Façades. Classification & illustration of façade concepts. Contributed Report 03," 2005.
- [17] S.W. Lee, J.S. Park, Evaluating thermal performance of double-skin facade using response factor, *Energy Build.* 209 (2020).
- [18] T. Zhang, Y. Tan, H. Yang, X. Zhang, The application of air layers in building envelopes: a review, *Appl. Energy* 165 (2016) 707–734.
- [19] L. Mei, D. Infield, U. Eicker, V. Fux, Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV façade, *Energy Build.* 35 (6) (2003) 605–617.
- [20] J. Joe, W. Choi, H. Kwon, J.H. Huh, Load characteristics and operation strategies of building integrated with multi-story double skin facade, *Energy Build.* 60 (2013) 185–198.
- [21] C. Gianfrini, M. Corcione, E. Habib, A. Quintino, Energy performance of a lightweight opaque ventilated facade integrated with the HVAC system using saturated exhaust indoor air, *Energy Build.* 50 (2012) 26–34.
- [22] A. Shukla, D.N. Nkwetta, Y.J. Cho, V. Stevenson, P. Jones, A state of art review on the performance of transpired solar collector, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (6) (2012) 3975–3985.
- [23] S. Li, J. Joe, J. Hu, P. Karava, System identification and model-predictive control of office buildings with integrated photovoltaic-thermal collectors, radiant floor heating and active thermal storage, *Sol. Energy* 113 (2015) 139–157.
- [24] S. Li, P. Karava, S. Currie, W.E. Lin, E. Savory, Energy modeling of photovoltaic thermal systems with corrugated unglazed transpired solar collectors - Part 1: Model development and validation, *Sol. Energy* 102 (2014) 282–296.
- [25] S. Li, P. Karava, Energy modeling of photovoltaic thermal systems with corrugated unglazed transpired solar collectors - Part 2: Performance analysis, *Sol. Energy* 102 (2014) 297–307.
- [26] K. Martín-Escudero, E. Salazar-Herran, A. Campos-Celador, G. Diarce-Belloso, I. Gomez-Arriaran, "Solar energy system for heating and domestic hot water supply by means of a heat pump coupled to a photovoltaic ventilated façade," *Sol. Energy*, vol. 183, no. December 2018, pp. 453–462, 2019.
- [27] J. Peng, D.C. Curcija, L. Lu, S.E. Selkowitz, H. Yang, R. Mitchell, Developing a method and simulation model for evaluating the overall energy performance of a ventilated semi-transparent photovoltaic double-skin facade, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 24 (6) (Jun. 2016) 781–799.
- [28] L. Olivieri, E. Caamaño-Martín, F. Olivieri, J. Neila, "Integral energy performance characterization of semi-transparent photovoltaic elements for building integration under real operation conditions," *Energy Build.*, vol. 68, no. PART A, pp. 280–291, Jan. 2014.
- [29] P.K. Ng, N. Mithraratne, H.W. Kua, Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings, *Energy Build.* 66 (2013) 274–281.
- [30] K.J. Kircher, K.M. Zhang, On the lumped capacitance approximation accuracy in RC network building models, *Energy Build.* 108 (2015) 454–462.
- [31] A.S. Ancrossed, D. Signelković, I. Mujan, S. Dakić, Experimental validation of a EnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade, *Energy Build.* 118 (2016) 27–36.
- [32] C. sung Lee, H. Lee, M. Choi, J. Yoon, Design optimization and experimental evaluation of photovoltaic double skin facade, *Energy Build.* 202 (2019) 109314.
- [33] N. Skandalos, D. Karamanis, Investigation of thermal performance of semi-transparent PV technologies, *Energy Build.* 124 (2016) 19–34.
- [34] M. Coussirat, A. Guardo, E. Jou, E. Eguisquiza, E. Cuerva, P. Alavedra, Performance and influence of numerical sub-models on the CFD simulation of free and forced convection in double-glazed ventilated façades, *Energy Build.* 40 (10) (2008) 1781–1789.
- [35] W. Pasut, M. De Carli, Evaluation of various CFD modelling strategies in predicting airflow and temperature in a naturally ventilated double skin faade, *Appl. Therm. Eng.* 37 (2012) 267–274.
- [36] Z. Ioannidis, E.D. Rounis, A. Athienitis, T. Stathopoulos, Double skin façade integrating semi-transparent photovoltaics: Experimental study on forced convection and heat recovery, *Appl. Energy* 278 (July) (2020) 115647.
- [37] L. Liao, A.K. Athienitis, L. Candanedo, K.W. Park, Y. Poissant, M. Collins, Numerical and experimental study of heat transfer in a BIPV-thermal system, *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME* 129 (4) (2007) 423–430.
- [38] M.J.N. Oliveira Panão, N.M. Mateus, G. Carrilho da Graça, Measured and modeled performance of internal mass as a thermal energy battery for energy flexible residential buildings, *Appl. Energy*, Apr. 239 (2019) 252–267.
- [39] S.O. Jensen et al., IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings, *Energy Build.* 155 (Nov. 2017) 25–34.
- [40] P.D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, J. Salpakari, Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45 (May 2015) 785–807.
- [41] P.H. Baker, H.A.L. van Dijk, PASLINK and dynamic outdoor testing of building components, *Build. Environ.* 43 (2) (Feb. 2008) 143–151.
- [42] C. García-Gáfaró, A. Erkoreka, C. Escudero-Revilla, I. Flores, J. Martínez-Fontecha, J.M.S. Lizarraga, Experience gained in the Thermal Characterization of Building Components by using Paslink Test Cells, in: in *Proceedings of the 5th IBPC*, 2012, pp. 331–338.
- [43] A. Erkoreka, "Eguzki and Ilargi PASLINK test cells, LCCE Vitoria-Gasteiz, Spain," in *Full scale test facilities for evaluation of energy and hygrothermal performances. International Workshop*, INIVE EEIG, Ed. Brussels, 2011, pp. 51–62.
- [44] E. Catto, A. Gelesz, K. Skeie, and G. Gennaro, "Modelling double skin façades (DSFs) in whole-building energy simulation tools : Validation and inter-software comparison of a mechanically ventilated single-story DSF," vol. 199, no. November 2020, 2021.
- [45] C. García-Gáfaró, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal, A. Erkoreka-González, K. Martín-Escudero, Dynamical edge effect factor determination for building components thermal characterization under outdoor test conditions in a PASLINK test cell: A methodological proposal, *Energy Build.* 210 (Mar. 2020).
- [46] ISO - International Organization for Standardization, ISO 6946, Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods. 2017.
- [47] G. Reynders, J. Diriken, D. Saelens, Quality of grey-box models and identified parameters as function of the accuracy of input and observation signals, *Energy Build.* 82 (2014) 263–274.
- [48] T. Berthou, P. Stabat, R. Salvazet, D. Marchio, Development and validation of a gray box model to predict thermal behavior of occupied office buildings, *Energy Build.* 74 (2014) 91–100.
- [49] J.J. Bloem, *System Identification Competition*. Luxembourg EUR 16359, European Commission (1996).
- [50] O. Gutschker, Parameter identification with the software package LORD, *Build. Environ.* 43 (2) (2008) 163–169.
- [51] J. Bloem, *System Identification Applied to Building Performance Data*. 1994.
- [52] P. Bacher, H. Madsen, Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings, *Energy Build.* 43 (7) (Jul. 2011) 1511–1522.
- [53] C. Escudero-Revilla, "Caracterización Experimental del Comportamiento Energético de Fachadas Ventiladas (Outdoor Test for Thermal Characterization of Ventilated Facades)," Phd Thesis (In Basque and Spanish Lang.). Thermal Engineering Department - ENEDI Group. University of the Basque Country UPV/EHU, Bilbao, Spain. 2016.
- [54] Spain, "Basic Document for Energy Saving of the Technical Building Code (Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación) (CTE-DB-HE)," 2019. [Online]. Available: <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html> [accessed 01.05.2021].
- [55] T. E. C. for S. (CEN), "EN 14511-3:2018. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps for space heating and cooling and process chillers, with electrically driven compressors - Part 3: Test methods." 2018.
- [56] M. Trčka, J.L.M. Hensen, M. Wetter, Co-simulation for performance prediction of integrated building and HVAC systems – An analysis of solution characteristics using a two-body system, *Simul. Model. Pract. Theory* 18 (7) (Aug. 2010) 957–970.
- [57] I. Beausoleil-Morrison, M. Kummert, F. MacDonald, R. Jost, T. McDowell, A. Ferguson, Demonstration of the new ESP-r and TRNSYS co-simulator for modelling solar buildings, *Energy Procedia* 30 (2012) 505–514.



Ensayo, modelado y análisis a escala de edificio de una Fachada Ventilada Forzada Fotovoltaica (FVFF) integrable en edificios de consumo casi nulo

ENEDI Research Group
Energetical Engineering Dep.
Carlos García-Gáfaró



Referencias.

- [1] European Commission, “Shedding light on energy in the EU - A guided tour of energy statistics,” *Eur. Comm.*, vol. 47, no. 4, pp. 1–28, 2021.
- [2] European Environment Agency, “Air quality in Europe — 2018 report,” 2018.
- [3] United Nations, “United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). FCC/INFORMAL/84/Rev.1 GE.14-20481 (E),” 1992.
- [4] United Nations, “Report of the World Commission on Environment and Development ‘Our Common Future’. A/42/427 87-18467 2999h (E).”
- [5] S. Tagliapietra, G. Zachmann, O. Edenhofer, J. M. Glachant, P. Linares, and A. Loeschel, “The European union energy transition: Key priorities for the next five years,” *Energy Policy*, vol. 132, pp. 950–954, Sep. 2019.
- [6] D. 2002/91/EC, “DIRECTIVE 2002/91/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2002 on the energy performance of buildings,” pp. 65–71, 2003.
- [7] D. 2009/28/EC, “DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC,” *Off. J. Eur. Union*, pp. 16–62, 2009.
- [8] The European Parliament and the Council of the European Union, “DIRECTIVE 2009/125/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products (recast),” *Off. J. Eur. Union*, vol. L, no. 285, pp. 10–35, 2009.
- [9] F. C. on C. C. United Nations, “Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amount Foreword,” 2016.
- [10] The Council of the European Union, “Council Decision 2002/358/CE of 25 April 2002 concerning the approval, on behalf of the European Community, of the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change and the joint fulfilment of commitments thereunder,” *Off. J. Eur. Communities*, vol. L, no. 130, 2002.
- [11] G. Liobikienė and M. Butkus, “The European Union possibilities to achieve targets of Europe 2020 and Paris agreement climate policy,” *Renew. Energy*, vol. 106, pp. 298–309, 2017.
- [12] Didier Coulomb, “COP 26 in Glasgow,” *Int. J. Refrig.*, vol. 132, pp. v–vi, Dec. 2021.
- [13] European Commission, “Eurostat Statistics Explained,” *Energy consumption in households*, 2021. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Energy_products_used_in_the_residential_sector.

- [14] European Union, “EPBD recast, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast),” *Off. J. Eur. Union*, vol. L, no. 153, pp. 13–35, 2010.
- [15] IPEEC Building Energy Efficiency Taskgroup, “Zero Energy Building Definitions and Policy Activity - An International Review,” 2018.
- [16] I. Sartori, A. Napolitano, and K. Voss, “Net zero energy buildings: A consistent definition framework,” *Energy Build.*, vol. 48, pp. 220–232, May 2012.
- [17] P. Fabris, “Powerhouse coalition builds energy positive buildings,” *Build. Des. Constr.*, May 2018.
- [18] P. Couty, M. J. Lalou, P. Cuony, S. Cotture, and V. Saade, “Positive energy building with PV facade production and electrical storage designed by the Swiss team for the U.S. Department of Energy Solar Decathlon 2017,” in *Energy Procedia*, 2017, vol. 122, pp. 919–924.
- [19] Temporary Working Group of the European Strategic Energy Technology, “Set-plan Action no 3.2. Implementation Plan Europe to become a global role model in integrated , innovative solutions for the planning , deployment , and replication of Positive Energy Districts,” no. June, 2018.
- [20] European Parliament, “Guidelines for Member States on calculating renewable energy from heat pumps from different heat pump technologies pursuant to Article 5 of Directive 2009/28/EC,” *Off. J. Eur. Union*, no. December, pp. 27–35, 2013.
- [21] M. Dongellini, C. Naldi, and G. L. Morini, “Sizing effects on the energy performance of reversible air-source heat pumps for office buildings,” *Appl. Therm. Eng.*, 2017.
- [22] M. A. . Çengel, Yunus A; Boles, *Thermodynamics. An Engineering Approach. 6th Edition*. McGraw-Hill Higher Education, 2007.
- [23] The European Parliament and the Council of the European Union, “Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources,” *Off. J. Eur. Union*, vol. 2018, no. December, 2018.
- [24] European Commission, “A policy framework for climate and energy in the period 2020 to 2030,” *Commun. From Comm. To Eur. Parliam. Counc. Eur. Econ. Soc. Comm. Comm. Reg.*, no. 2014, p. 18, 2014.
- [25] European Commission, “A Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy - Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European and Social Committee and the Committee,” p. 25, 2018.
- [26] V. Bianco, F. Scarpa, and L. A. Tagliafico, “Estimation of primary energy savings by using heat pumps for heating purposes in the residential sector,” *Appl. Therm. Eng.*, 2017.
- [27] A. Philippe and L. Jean, “EBC Annex 48: heat pumping and reversible air conditioning-Project summary report,” Hertfordshire, United Kingdom, 2013.
- [28] A. Vallati, P. Ocloñ, C. Colucci, L. Mauri, R. de Lieto Vollaro, and J. Taler, “Energy analysis of a thermal system composed by a heat pump coupled with a PVT solar collector,” *Energy*, pp. 91–96, May 2019.

- [29] E. Kinab, D. Marchio, P. Rivière, and A. Zoughaib, “Reversible heat pump model for seasonal performance optimization,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 12, pp. 2269–2280, 2010.
- [30] C. M. Lai and S. Hokoi, “Solar façades: A review,” *Build. Environ.*, 2015.
- [31] A. GhaffarianHoseini, “Intelligent Facades in Low-Energy Buildings,” *Br. J. Environ. Clim. Chang.*, vol. 2, no. 4, pp. 437–464, 2013.
- [32] P. Omojaro and C. Breitkopf, “Direct expansion solar assisted heat pumps: A review of applications and recent research,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 33–45, Jun. 2013.
- [33] J. Cao *et al.*, “A review on independent and integrated/coupled two-phase loop thermosyphons,” *Appl. Energy*, vol. 280, p. 115885, Dec. 2020.
- [34] A. Del Amo, A. Martínez-Gracia, A. A. Bayod-Rújula, and M. Cañada, “Performance analysis and experimental validation of a solar-assisted heat pump fed by photovoltaic-thermal collectors,” *Energy*, vol. 169, pp. 1214–1223, Feb. 2019.
- [35] G. Emmi, A. Zarrella, and M. De Carli, “A heat pump coupled with photovoltaic thermal hybrid solar collectors: A case study of a multi-source energy system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 151, pp. 386–399, Nov. 2017.
- [36] J. C. Hadorn, *Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings*. wiley, 2015.
- [37] IEA-SHC Task53, “Solar Heating and Cooling & Solar Air-Conditioning - Position Paper,” Innsbruck, Austria, 2018.
- [38] E. Frank, M. Haller, S. Herkel, and J. Ruschenburg, “Systematic classification of combined solar thermal and heat pump systems,” in *Proc. of the EuroSun 2010 Conference, Graz, Austria*, 2010.
- [39] X. Wang *et al.*, “A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources,” *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 2472–2487, Feb. 2020.
- [40] J. Cai, Z. Li, J. Ji, and F. Zhou, “Performance analysis of a novel air source hybrid solar assisted heat pump,” *Renew. Energy*, vol. 139, pp. 1133–1145, Aug. 2019.
- [41] J. Cai, F. Zhang, and J. Ji, “Comparative analysis of solar-air dual source heat pump system with different heat source configurations,” *Renew. Energy*, vol. 150, pp. 191–203, May 2020.
- [42] M. Qu, J. Chen, L. Nie, F. Li, Q. Yu, and T. Wang, “Experimental study on the operating characteristics of a novel photovoltaic/thermal integrated dual-source heat pump water heating system,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 94, pp. 819–826, Feb. 2016.
- [43] W. Deng and J. Yu, “Simulation analysis on dynamic performance of a combined solar/air dual source heat pump water heater,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 378–387, Jul. 2016.
- [44] D. Jonas, D. Theis, F. Felgner, and G. Frey, “A TRNSYS-based simulation framework for the analysis of solar thermal and heat pump systems,” *Appl. Sol. Energy*, vol. 53, no. 2, pp. 126–137, 2017.

- [45] A. H. A. Al-Waeli, K. Sopian, H. A. Kazem, and M. T. Chaichan, “Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems: Status and future prospects,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 109–130, Sep. 2017.
- [46] G. Hailu, P. Dash, and A. S. Fung, “Performance Evaluation of an Air Source Heat Pump Coupled with a Building-Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPV/T) System under Cold Climatic Conditions,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1913–1918, Nov. 2015.
- [47] R. Kamel, N. Ekrami, P. Dash, A. Fung, and G. Hailu, “BIPV/T+ASHP: Technologies for NZEBs,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 424–429, Nov. 2015.
- [48] R. S. Kamel and A. S. Fung, “Modeling, simulation and feasibility analysis of residential BIPV/T+ASHP system in cold climate—Canada,” *Energy Build.*, vol. 82, pp. 758–770, Oct. 2014.
- [49] C. Cao, H. Li, G. Feng, R. Zhang, and K. Huang, “Research on PV/T – Air Source Heat Pump Integrated Heating System in Severe Cold Region,” *Procedia Eng.*, vol. 146, pp. 410–414, Jan. 2016.
- [50] H. Li, C. Cao, G. Feng, R. Zhang, and K. Huang, “A BIPV/T System Design Based on Simulation and its Application in Integrated Heating System,” *Procedia Eng.*, vol. 121, pp. 1590–1596, Jan. 2015.
- [51] S. Poppi *et al.*, “Analysis of system improvements in solar thermal and air source heat pump combisystems,” *Appl. Energy*, vol. 173, pp. 606–623, 2016.
- [52] B. C. P. Stefano, “Techno-economic analysis of a novel solar thermal and air-source heat pump system.” p. Paper 1638, 2016.
- [53] P. Stefano, B. Chris, Y. H. Michel, and others, “Influence of boundary conditions and component size on electricity demand in solar thermal and heat pump combisystems,” *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 1062–1073, 2016.
- [54] J. F. Chen, Y. J. Dai, and R. Z. Wang, “Experimental and theoretical study on a solar assisted CO₂ heat pump for space heating,” *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 295–304, Apr. 2016.
- [55] H. Li and Y. Sun, “Operational performance study on a photovoltaic loop heat pipe/solar assisted heat pump water heating system,” *Energy Build.*, vol. 158, pp. 861–872, Jan. 2018.
- [56] Y. H. Li and W. C. Kao, “Performance analysis and economic assessment of solar thermal and heat pump combisystems for subtropical and tropical region,” *Sol. Energy*, vol. 153, pp. 301–316, Sep. 2017.
- [57] C. Fraga, P. Hollmuller, F. Mermoud, and B. Lachal, “Solar assisted heat pump system for multifamily buildings: Towards a seasonal performance factor of 5? Numerical sensitivity analysis based on a monitored case study,” *Sol. Energy*, vol. 146, pp. 543–564, Apr. 2017.
- [58] E. Bellos, C. Tzivanidis, K. Moschos, and K. A. Antonopoulos, “Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 306–319, Jul. 2016.

- [59] X. Dong, Q. Tian, and Z. Li, “Energy and exergy analysis of solar integrated air source heat pump for radiant floor heating without water,” *Energy Build.*, vol. 142, pp. 128–138, May 2017.
- [60] X. Dong, Q. Tian, and Z. Li, “Experimental investigation on heating performance of solar integrated air source heat pump,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 123, pp. 1013–1020, Aug. 2017.
- [61] K. Bakirci and B. Yuksel, “Experimental thermal performance of a solar source heat-pump system for residential heating in cold climate region,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 8–9, pp. 1508–1518, Jun. 2011.
- [62] M. S. Buker and S. B. Riffat, “Solar assisted heat pump systems for low temperature water heating applications: A systematic review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 399–413, Mar. 2016.
- [63] J. Cai, J. Ji, Y. Wang, and W. Huang, “Numerical simulation and experimental validation of indirect expansion solar-assisted multi-functional heat pump,” *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 280–290, Aug. 2016.
- [64] C. Fraga, F. Mermoud, P. Hollmuller, E. Pampaloni, and B. Lachal, “Large solar driven heat pump system for a multifamily building: Long term in-situ monitoring,” *Sol. Energy*, vol. 114, pp. 427–439, Apr. 2015.
- [65] C. Wang, G. Gong, H. Su, and C. Wah Yu, “Efficacy of integrated photovoltaics-air source heat pump systems for application in Central-south China,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, pp. 1190–1197, Sep. 2015.
- [66] F. J. Aguilar, S. Aledo, and P. V. Quiles, “Experimental analysis of an air conditioner powered by photovoltaic energy and supported by the grid,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 123, pp. 486–497, Aug. 2017.
- [67] G. Manzolini, L. P. M. Colombo, S. Romare, and D. Fustinoni, “Tiles as solar air heater to support a heat pump for residential air conditioning,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 102, pp. 1412–1421, Jun. 2016.
- [68] G. Wang, Z. Quan, Y. Zhao, P. Xu, and C. Sun, “Experimental Study of a Novel PV/T-Air Composite Heat Pump Hot Water System,” *Energy Procedia*, vol. 70, pp. 537–543, May 2015.
- [69] L. Ni, D. Qv, Y. Yao, F. Niu, and W. Hu, “An experimental study on performance enhancement of a PCM based solar-assisted air source heat pump system under cooling modes,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 100, pp. 434–452, May 2016.
- [70] F. Niu, L. Ni, Y. Yao, Y. Yu, and H. Li, “Performance and thermal charging/discharging features of a phase change material assisted heat pump system in heating mode,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 58, no. 1–2, pp. 536–541, Sep. 2013.
- [71] E. Oesterle and E. Oesterle, *Double-skin facades: integrated planning LK - https://ehu.on.worldcat.org/oclc/932458730*. Munich SE - 207 p. : il: Prestel, 2001.
- [72] X. Loncour, A. Deneyer, M. Blasco, G. Flamant, and P. Wouters, “Ventilated Double Skin Façades. Classification & illustration of façade concepts. Contributed Report 03,” 2005.

- [73] S. W. Lee and J. S. Park, “Evaluating thermal performance of double-skin facade using response factor,” *Energy Build.*, vol. 209, 2020.
- [74] T. Zhang, Y. Tan, H. Yang, and X. Zhang, “The application of air layers in building envelopes: A review,” *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 707–734, 2016.
- [75] L. Mei, D. Infield, U. Eicker, and V. Fux, “Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV façade,” *Energy Build.*, vol. 35, no. 6, pp. 605–617, 2003.
- [76] J. Joe, W. Choi, H. Kwon, and J. H. Huh, “Load characteristics and operation strategies of building integrated with multi-story double skin facade,” *Energy Build.*, vol. 60, pp. 185–198, 2013.
- [77] C. Cianfrini, M. Corcione, E. Habib, and A. Quintino, “Energy performance of a lightweight opaque ventilated façade integrated with the HVAC system using saturated exhaust indoor air,” *Energy Build.*, vol. 50, pp. 26–34, 2012.
- [78] A. Shukla, D. N. Nkwetta, Y. J. Cho, V. Stevenson, and P. Jones, “A state of art review on the performance of transpired solar collector,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3975–3985, 2012.
- [79] S. Li, J. Joe, J. Hu, and P. Karava, “System identification and model-predictive control of office buildings with integrated photovoltaic-thermal collectors, radiant floor heating and active thermal storage,” *Sol. Energy*, vol. 113, pp. 139–157, 2015.
- [80] S. Li, P. Karava, S. Currie, W. E. Lin, and E. Savory, “Energy modeling of photovoltaic thermal systems with corrugated unglazed transpired solar collectors - Part 1: Model development and validation,” *Sol. Energy*, vol. 102, pp. 282–296, 2014.
- [81] S. Li and P. Karava, “Energy modeling of photovoltaic thermal systems with corrugated unglazed transpired solar collectors - Part 2: Performance analysis,” *Sol. Energy*, vol. 102, pp. 297–307, 2014.
- [82] K. Martin-Escudero, E. Salazar-Herran, A. Campos-Celador, G. Diarce-Belloso, and I. Gomez-Arriaran, “Solar energy system for heating and domestic hot water supply by means of a heat pump coupled to a photovoltaic ventilated façade,” *Sol. Energy*, vol. 183, no. December 2018, pp. 453–462, 2019.
- [83] J. Peng, D. C. Curcija, L. Lu, S. E. Selkowitz, H. Yang, and R. Mitchell, “Developing a method and simulation model for evaluating the overall energy performance of a ventilated semi-transparent photovoltaic double-skin facade,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 24, no. 6, pp. 781–799, Jun. 2016.
- [84] L. Olivieri, E. Caamaño-Martin, F. Olivieri, and J. Neila, “Integral energy performance characterization of semi-transparent photovoltaic elements for building integration under real operation conditions,” *Energy Build.*, vol. 68, no. PARTA, pp. 280–291, Jan. 2014.
- [85] P. K. Ng, N. Mithraratne, and H. W. Kua, “Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings,” *Energy Build.*, vol. 66, pp. 274–281, 2013.
- [86] K. J. Kircher and K. M. Zhang, “On the lumped capacitance approximation accuracy in RC network building models,” *Energy Build.*, vol. 108, pp. 454–462, 2015.

- [87] A. S. Ancrossed D Signelković, I. Mujan, and S. Dakić, “Experimental validation of a EnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade,” *Energy Build.*, vol. 118, pp. 27–36, 2016.
- [88] C. sung Lee, H. Lee, M. Choi, and J. Yoon, “Design optimization and experimental evaluation of photovoltaic double skin facade,” *Energy Build.*, vol. 202, p. 109314, 2019.
- [89] N. Skandalos and D. Karamanis, “Investigation of thermal performance of semi-transparent PV technologies,” *Energy Build.*, vol. 124, pp. 19–34, 2016.
- [90] M. Coussirat, A. Guardo, E. Jou, E. Egusquiza, E. Cuerva, and P. Alavedra, “Performance and influence of numerical sub-models on the CFD simulation of free and forced convection in double-glazed ventilated façades,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 10, pp. 1781–1789, 2008.
- [91] W. Pasut and M. De Carli, “Evaluation of various CFD modelling strategies in predicting airflow and temperature in a naturally ventilated double skin faade,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 37, pp. 267–274, 2012.
- [92] Z. Ioannidis, E. D. Rounis, A. Athienitis, and T. Stathopoulos, “Double skin façade integrating semi-transparent photovoltaics: Experimental study on forced convection and heat recovery,” *Appl. Energy*, vol. 278, no. July, p. 115647, 2020.
- [93] L. Liao, A. K. Athienitis, L. Candanedo, K. W. Park, Y. Poissant, and M. Collins, “Numerical and experimental study of heat transfer in a BIPV-thermal system,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 129, no. 4, pp. 423–430, 2007.
- [94] H. Wolisz, T. M. Kull, D. Müller, and J. Kurnitski, “Self-learning model predictive control for dynamic activation of structural thermal mass in residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 207, p. 109542, 2020.
- [95] M. J. N. Oliveira Panão, N. M. Mateus, and G. Carrilho da Graça, “Measured and modeled performance of internal mass as a thermal energy battery for energy flexible residential buildings,” *Appl. Energy*, vol. 239, pp. 252–267, Apr. 2019.
- [96] S. Ø. Jensen *et al.*, “IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings,” *Energy Build.*, vol. 155, pp. 25–34, Nov. 2017.
- [97] P. D. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, and J. Salpakari, “Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 785–807, May 2015.
- [98] P. H. Baker and H. A. L. van Dijk, “PASLINK and dynamic outdoor testing of building components,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 2, pp. 143–151, Feb. 2008.
- [99] C. García-Gáfaró, A. Erkoreka, C. Escudero-Revilla, I. Flores, J. Martínez-Fontecha, and J. M. S. Lizarraga, “Experience gained in the Thermal Characterization of Building Components by using Paslink Test Cells,” in *Proceedings of the 5th IBPC*, 2012, pp. 331–338.
- [100] A. Erkoreka, “Eguzki and Ilargi PASLINK test cells, LCCE Vitoria-Gasteiz, Spain,” in *Full scale test facilities for evaluation of energy and hygrothermal performances. International Workshop*, INIVE EEIG, Ed. Brussels, 2011, pp. 51–62.

- [101] E. Catto, A. Gelesz, K. Skeie, and G. Gennaro, “Modelling double skin façades (DSFs) in whole-building energy simulation tools : Validation and inter-software comparison of a mechanically ventilated single-story DSF,” vol. 199, no. November 2020, 2021.
- [102] C. Escudero-Revilla, “Caracterización Experimental del Comportamiento Energético de Fachadas Ventiladas (Outdoor Test for Thermal Characterization of Ventilated Facades),” Phd Thesis (In Basque and Spanish Lang.). Thermal Engineering Department - ENEDI Group. University of the Basque Country UPV/EHU, Bilbao, Spain. 2016.
- [103] G. Cattarin, F. Causone, A. Kindinis, and L. Pagliano, “Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation – A literature review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 606–625, 2016.
- [104] P. a. Strachan and P. H. Baker, “Editorial - Outdoor testing, analysis and modelling of building components,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 2, pp. 127–128, 2008.
- [105] L. Vandaele and P. Wouters, “The PASSYS Services, Summary Report. BBRI and EC DG XII. EUR 15113 EN.,” Brussels, EUR 15113 EN, 1994.
- [106] H. A. L. A. L. Van Dijk and G. P. P. Van der Linden, “The PASSYS method for testing passive solar components,” *Build. Environ.*, vol. 28, no. 2, pp. 115–126, 1993.
- [107] T. F. van Dijk HAL, “Final report of the JOULE II COMPASS Project (JOU2-CT92-0216),” 1995.
- [108] H. A. L. Van Dijk and F. Tellez, “COMPASS Measurement and data analysis procedures,” Brussels, JOULE II - COMPASS, 1995.
- [109] L. Vandaele, P. Wouters, and H. Bloem, “IQ-test - Improving quality in testing and evaluation of solar and thermal characteristics of building components,” in *23rd AIVC and EPIC 2002 Conference*, 2002, pp. 853–858.
- [110] P. Baker, “IQ-test—improving quality in testing and evaluation of solar and thermal characteristics of building components,” *Energy Build.*, vol. 36, no. 5, pp. 435–441, 2004.
- [111] P. H. Baker, “Evaluation of round-robin testing using the PASLINK test facilities,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 2, pp. 181–188, Feb. 2008.
- [112] H. A. L. Van Dijk and F. Van Der Graaf, “Research report HFS Tiles for the Passys Test Cells,” TNO Building and Construction Research, Delft, 1994.
- [113] K. Martin, A. Erkoreka, I. Flores, M. Odriozola, and J. M. Sala, “Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 2–3, pp. 529–535, 2011.
- [114] G. P. Van Der Linden, H. A. L. Van Dick, A. J. Lock, and F. Van Der Graaf, “COMPASS Installation guide HFS tiles for the PASSYS test cells,” Brussels, JOULE II - COMPASS, 1995.
- [115] B. Saxhof, “Paslink Calibration Manual,” Brussels, JOULE II - COMPASS (A revision of the PASSYS calibration manual. ed. B. stanzel, ITW university of stuttgart. EUR 15120 EN), 1995.

- [116] S. J. M. Erkoreka A., Escudero C., Flores I., Garcia C., “Upgrading and calibration of two PASLINK test cells. Evaluation through the ‘IQ-TEST’ round- robin test,” in *DYNASTEE workshop on Dynamic Methods for Building Energy Assessment*, 2010.
- [117] A. Janssens, *Inventory of full scale test facilities for evaluation of building energy performances*. KULeuven, 2016.
- [118] S. Roels, “Annex 58 Project Summary Report - Reliable Building Energy Performance Characterisation Based on Full Scale Dynamic Measurements,” Wimbledon, London, UK., 2017.
- [119] A. Janssens, S. Roels, and L. Vandaele, *Full Scale Test Facilities for Evaluation of Energy and Hygro thermal Performance*. INIVE-DYNASTEE International Workshop, Brussels, 2011.
- [120] F. Ochs, D. Siegele, G. Dermentzis, and W. Feist, “Prefabricated Timber Frame Façade with Integrated Active Components for Minimal Invasive Renovations,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 61–66, 2015.
- [121] H. Hens, A. Janssens, W. Depraetere, J. Carmeliet, and J. Lecompte, “Brick Cavity Walls: A Performance Analysis Based on Measurements and Simulations,” *J. Build. Phys.*, vol. 31, no. 2, pp. 95–124, Oct. 2007.
- [122] T. Z. Desta, J. Langmans, and S. Roels, “Experimental data set for validation of heat, air and moisture transport models of building envelopes,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 5, pp. 1038–1046, May 2011.
- [123] W. Maref, M. A. Lacasse, and D. G. Booth, “Large-scale laboratory measurements and benchmarking of an advanced hygrothermal model,” in *CIB 2004 Conference: 02 May 2004, Toronto, Ontario*, pp. 1–11.
- [124] M. Liu, K. B. Wittchen, and P. K. Heiselberg, “Verification of a simplified method for intelligent glazed façade design under different control strategies in a full-scale façade test facility – Preliminary results of a south facing single zone experiment for a limited summer period,” *Build. Environ.*, vol. 82, pp. 400–407, Dec. 2014.
- [125] S. Pinard, G. Fraisse, C. Ménézo, and V. Renzi, “Experimental study of a chimney enhanced heat emitter designed for internal renovation of buildings,” *Energy Build.*, vol. 54, pp. 169–178, Nov. 2012.
- [126] G. Alcamo, “Daylight distribution and thermo-physical evaluation of new facade components through a test cell for the overheating control in Mediterranean Climate,” in *Proceedings of the 5th international conference SOLARIS*, 2011.
- [127] M. J. Jiménez, B. Porcar, and M. R. Heras, “Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions,” *Sol. Energy*, vol. 82, no. 7, pp. 573–587, 2008.
- [128] M. J. Jiménez, B. Porcar, and M. R. Heras, “Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 2, pp. 361–367, Feb. 2009.
- [129] S. Martínez, A. Erkoreka, P. Eguía, E. Granada, and L. Febrero, “Energy characterization of a PASLINK test cell with a gravel covered roof using a novel

- methodology: Sensitivity analysis and Bayesian calibration,” *J. Build. Eng.*, vol. 22, pp. 1–11, Mar. 2019.
- [130] L. Bianco, P. Schneuwly, E. Wurtz, and A. Brun, “Design of a New Full-scale Facility for Building Envelope Test: FACT (FACade Tool),” *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 256–266, Mar. 2017.
- [131] F. Alzetto, D. Farmer, R. Fitton, T. Hughes, and W. Swan, “Comparison of whole house heat loss test methods under controlled conditions in six distinct retrofit scenarios,” *Energy Build.*, vol. 168, pp. 35–41, Jun. 2018.
- [132] Danish Technological Institute, “EnergyFlexHouse.” [Online]. Available: <https://www.dti.dk/labs/energyflexhouse/technology-to-the-global-challenge/25348>. [Accessed: 01-Dec-2018].
- [133] EN ISO 10211:2012, *Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations.* .
- [134] K. Martin, A. Campos-Celador, C. Escudero, I. Gómez, and J. M. Sala, “Analysis of a thermal bridge in a guarded hot box testing facility,” *Energy Build.*, vol. 50, pp. 139–149, 2012.
- [135] W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, and Y. I. Cho, *Handbook of heat transfer*. McGraw-Hill, 1998.
- [136] Euskalmet-Meteorological Agency of the Basque Country, “Seasonal Cimatology of Euskadi (in spanish).” [Online]. Available: http://www.euskalmet.euskadi.eus/s07-5853x/es/contenidos/informacion/cli_2019/es_cliueus/es_es2019.html. [Accessed: 01-Nov-2019].
- [137] A. Afram and F. Janabi-Sharifi, “Black-box modeling of residential HVAC system and comparison of gray-box and black-box modeling methods,” *Energy Build.*, vol. 94, pp. 121–149, 2015.
- [138] M. Killian, B. Mayer, and M. Kozek, “Effective fuzzy black-box modeling for building heating dynamics,” *Energy Build.*, vol. 96, pp. 175–186, 2015.
- [139] C. Green and S. Garimella, “Residential microgrid optimization using grey-box and black-box modeling methods,” *Energy Build.*, vol. 235, p. 110705, 2021.
- [140] T. Berthou, P. Stabat, R. Salvazet, and D. Marchio, “Development and validation of a gray box model to predict thermal behavior of occupied office buildings,” *Energy Build.*, vol. 74, pp. 91–100, 2014.
- [141] G. Reynders, J. Diriken, and D. Saelens, “Quality of grey-box models and identified parameters as function of the accuracy of input and observation signals,” *Energy Build.*, vol. 82, pp. 263–274, 2014.
- [142] R. Gajewski and P. Pieniasek, “Building energy modelling and simulations: Qualitative and quantitative analysis,” *MATEC Web Conf.*, vol. 117, pp. 1–6, 2017.
- [143] J. J. Bloem, *System Identification Competition*, EUR 16359. L-2985 Luxembourg: Commission, European, 1996.
- [144] H. A. L. van Dijk and F. Tellez, “Measurement and data analysis procedures. COMPASS Final Report.” Brussels, 1995.

- [145] L. Wouters and L. Vandaele, “PASLINK Final activity report,” 1995.
- [146] “PASLINK - The grouping of outdoor test centres.pdf.” .
- [147] PASSLINK EEIG, “Improving quality in test and evaluation procedures of solar and thermal performances of building components - The IQ-TEST Project,” 2003.
- [148] J. J. Bloem, *System identification applied to building performance data. EUR 15885. L-2985 Luxembourg*: European Commission, 1994.
- [149] O. Gutschker, “Parameter identification with the software package LORD,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 2, pp. 163–169, 2008.
- [150] H. A. L. Van Dijk and G. P. Van der Linden, “MRQT user guide; manual for MRQT and the package MRQT/PASTA,” in *Workshop on application of system identification in energy savings in buildings.*, E. Bloem JJ, Ed. Luxembourg. EUR 15566: Office for Official Publications of the European Communities, 1994, pp. 3–39.
- [151] H. Madsen and J. Holst, “Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building,” *Energy Build.*, vol. 22, no. 1, pp. 67–79, 1995.
- [152] N. R. Kristensen and H. Madsen, “Continuous Time Stochastic Modelling CTSM 2.3 User’s Guide.” Technical University of Denmark, p. 64, 2003.
- [153] C. García-Gáfaró, C. Escudero-Revilla, I. Flores-Abascal, A. Erkoreka-González, and K. Martín-Escudero, “Dynamical edge effect factor determination for building components thermal characterization under outdoor test conditions in a PASLINK test cell: A methodological proposal,” *Energy Build.*, vol. 210, Mar. 2020.
- [154] M. A. Hasan and S. K. Parida, “An overview of solar photovoltaic panel modeling based on analytical and experimental viewpoint,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 75–83, 2016.
- [155] Y. A. Çengel and A. J. (Afshin J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa : fundamentos y aplicaciones*, 4a ed. México, D.F. SE - xxii, 920 p. : il. ; 27 cm + 1 DVD-ROM (4 3/4 plg.): McGraw-Hill, 2011.
- [156] T. Zhou, L. Peng, Y. Liu, Y. Zhan, F. Liu, and A. Zhang, “An insight into the sequential order in 2D correlation spectroscopy using polymer transitions: Boltzmann Sigmoid, Gaussian Cumulative, Lorentz Cumulative, and Asymmetric Sigmoid. Findings in experiments and simulations,” *Vib. Spectrosc.*, vol. 70, pp. 137–161, 2014.
- [157] ISO - International Organization for Standardization, *ISO 6946, Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation methods*. 2017.
- [158] “IBPSA-USA, Building Energy Software Tools (BEST) directory.” [Online]. Available: <https://www.buildingenergysoftwaretools.com/software-listing?keywords=EnergyPlus>.
- [159] A. Chong, Y. Gu, and H. Jia, “Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work,” *Energy Build.*, vol. 253, p. 111533, Dec. 2021.
- [160] “Meteonorm Software from Meteotest. Continuously updated historic, current and future meteorological data.” [Online]. Available: <https://meteonorm.meteotest.ch/en/>.

-
- [161] J. A. Clarke, *Energy simulation in building design*, 2nd ed. Oxford, England ; SE, 362 p: Butterworth-Heinemann, 2001.