UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**Control domótico de un acristalamiento activo con
cámara de agua circulante para la reducción
de la demanda energética de
Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo**

TESIS DOCTORAL

Luis Jesús Claros Marfil

Ingeniero Químico

2017

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y
TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**Control domótico de un acristalamiento activo con cámara de agua
circulante para la reducción de la demanda energética de
Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo**

Autor:

Luis J. Claros Marfil

Ingeniero Químico

entregada al Dpto. de Construcción y Tecnología Arquitectónicas
como parte de los requisitos para optar al grado de
Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid

Directores:

Benito Lauret Aguirregabiria

Doctor Arquitecto

J. Francisco Padial Molina

Doctor en Ciencias Matemáticas

2017

Tribunal nombrado por el Magnífico y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día _____ de _____ de 2017.

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Realizando el acto de defensa y lectura de tesis el día _____ de _____ de 2017 en la ETS de Arquitectura de Madrid.

Fdo. el Presidente

Fdo. el Secretario

Fdo. los Vocales

A mi mujer María José y a mi hijo Luis.

A mis padres Salvador y M^a Dolores.

A la memoria de mis abuelos Luis y Dolores.

Agradecimientos

Dice Umberto Eco en su libro *Cómo se hace una tesis* que es de mal gusto dar las gracias al *ponente* o director de la tesis, pues cuando ayuda al doctorando no está más que cumpliendo con su obligación. No obstante, y sin ánimo de contradecir al maestro, me gustaría en primer lugar darle las gracias a mis directores Benito Lauret y J. Francisco Padial, pues estoy seguro de que tanto su dedicación como su interés han ido más allá de lo formalmente exigible a unos directores de tesis.

Además, me gustaría darle las gracias a las siguientes personas:

A los profesores Arno Dentel y Wolfram Stephan, así como a Christina Betzold, por acogerme en el *Institut für Energie un Gebaude* de la *Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm*, y darme la oportunidad de llevar a cabo las simulaciones en TRNSYS. *Danke vielmals!*

A Marion Hiller de Transsolar Energietechnik, por recibirme y explicarme algunos de los entresijos del funcionamiento del Type 56 de TRNSYS.

En cuanto a la logística, quiero darle las gracias a D^a. Pilar Otero, de la Biblioteca de la ETS de Arquitectura, por facilitarme los artículos requeridos, que no siempre eran sencillos de encontrar; y a los programadores de TeXLive, TexStudio y Jabref por crear herramientas de calidad y gratuitas.

Entre mis compañeros de doctorado me gustaría darle las gracias a Vicente, por compartir cafés, ideas, preocupaciones, alternativas y soluciones desde ambos lados del charco. También a Graciela y a Estéfana, siempre dispuestas a echar una mano cuando se necesita.

En la categoría de amigos sufridores quiero darle las gracias a Antonio, por los *componentes*, raros, pero funcionales y de coste óptimo, y por el asesoramiento técnico; y a Fernando, por los servicios de consultoría, siempre *open-source*, del taller de L^AT_EX 24 h, y por las revisiones de los borradores de la tesis. ¿Qué habría sido de nosotros sin los *MWE*?

A Jesús, por su inestimable asistencia hispalense, nunca tendremos otro *canguro PhD* a un precio tan económico.

A mis padres y a mis hermanas, por su apoyo incondicional, sin el que no hubiera sido posible terminar esta Tesis. Especialmente a Águeda, por la revisión lingüística de las diferentes versiones y borradores.

Por último, a mi mujer María José y a mi hijo Luis, por su cariño y su paciencia a pesar de haber sufrido los efectos de esta tesis a diario, en vivo y en directo.

Yo sé quién soy -respondió don Quijote-, y sé que puedo ser [...].

Miguel de Cervantes

If you are going to be passionate about something, be passionate about learning.

Daniel Golston

*An expert is a person who has found out by his own painful experience
all the mistakes that one can make in a very narrow field.*

Niels Bohr

Índice general

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XVII
Resumen	1
Abstract	3
Rendimientos científico-tecnológicos	5
1 Introducción	7
1.1 Situación actual del consumo energético de los edificios	9
1.2 Influencia de los acristalamientos en el ambiente interior de los edificios	11
1.3 Edificios de consumo de energía casi nulo (EECN)	14
1.4 Relevancia del control en los Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo . . .	19
2 Hipótesis y objetivos	21
2.1 Hipótesis de partida	23
2.2 Objetivo principal	23
2.3 Objetivos secundarios	24
2.4 Justificación	24
3 Estado del arte	27
3.1 Estado de la investigación	29
3.1.1 Fachadas solares térmicamente activas	29
3.1.2 Acristalamientos activos con agua en circulación	39

3.1.3	Control de sistemas solares destinados al acondicionamiento	54
3.1.4	Control de sistemas de acondicionamiento	74
3.1.5	Sistemas solares asociados a sistemas de acondicionamiento	75
3.1.6	Fachadas activas y edificios inteligentes	82
3.2	Estado de la técnica	87
3.2.1	Cerramientos activos con cámara de agua circulante	90
3.2.2	Edificios con acristalamientos activos con agua en circulación	98
3.2.3	Sistemas comerciales de gestión energética en edificios	105
3.3	Conclusiones del Estado del Arte	110
3.3.1	Relacionadas con el uso de fachadas como elementos captadores activos	110
3.3.2	Relacionadas con la necesidad del control en las fachadas activas . . .	110
4	Metodologías documental y experimental	113
4.1	Metodología documental	115
4.2	Metodología experimental	116
4.2.1	Antecedentes del método de ensayo empleado	116
4.2.2	Descripción de la instalación experimental y sus componentes	119
4.2.3	Sistema de control domótico	123
4.3	Puesta en marcha del ensayo experimental	140
4.4	Ensayos experimentales desarrollados	142
4.4.1	Ensayos preliminares: verificación y prueba del sistema de control . . .	144
4.4.2	Tipos de ensayos realizados	145
4.4.3	Ensayos en condiciones de demanda de calefacción	148
4.4.4	Submodos de funcionamiento con demanda de calefacción	149
4.5	Ensayos en condiciones de Demanda de Refrigeración	155
4.5.1	Submodos de funcionamiento en Modo Demanda de Refrigeración . . .	156
4.6	Programación y carga del código programado	162
4.7	Condicionantes de operación	163
4.8	Conclusiones parciales en cuanto a las metodologías documental y experimental	165
5	Metodología y primeros resultados de modelado	167
5.1	Modelo del módulo solar experimental	169
5.2	Modelos de los acristalamientos activos con agua en circulación	173
5.2.1	Modelo detallado	176
5.2.2	Modelo simplificado	187
5.3	Conclusiones parciales en cuanto a la metodología de modelado	192

6	Metodología y resultados preliminares de simulación	193
6.1	Software de simulación: TRNSYS	195
6.2	Elementos considerados en la simulación	197
6.3	Simulación del vidrio de referencia: resultados	197
6.4	Simulación del vidrio con cámara de agua en circulación: resultados	199
6.5	Conclusiones parciales en cuanto a la metodología de simulación	206
7	Resultados	207
7.1	Resultados experimentales	209
7.1.1	Justificación de la necesidad de control	209
7.1.2	Resultados experimentales en condiciones de demanda de calefacción	211
7.1.3	Resultados experimentales en condiciones de demanda de refrigeración	224
7.2	Resultados de simulación	231
7.2.1	Condiciones de simulación	233
7.2.2	Demandas energéticas del taller	236
7.2.3	Consumos del Taller docente	237
7.3	Evaluación económica de los escenarios	267
7.3.1	Evaluación económica del Escenario 2	268
7.3.2	Evaluación económica del Escenario 3-1	269
7.3.3	Evaluación económica del Escenario 3-2	271
7.3.4	Evaluación económica del Escenario 4-1	272
7.3.5	Evaluación económica del Escenario 4-2	274
8	Discusión de resultados	277
8.1	Discusión de los resultados experimentales	279
8.1.1	Efecto del controlador sobre la temperatura interior	279
8.1.2	Efecto del controlador sobre la temperatura del agua acumulada	283
8.1.3	Efectos del controlador sobre el consumo nocturno	289
8.2	Discusión de los resultados de simulación	294
8.2.1	Consumos de calefacción	295
8.2.2	Consumos de refrigeración	306
8.2.3	Consumos totales	308
8.2.4	Emisiones de dióxido de carbono de los escenarios	310
8.2.5	Comparación de las diferentes evaluaciones económicas de los escenarios simulados	311
8.3	Conclusiones acerca de la discusión de resultados	313
8.3.1	Conclusiones sobre los resultados experimentales	313

8.3.2	Conclusiones sobre los resultados de simulación	313
8.3.3	Conclusiones sobre los resultados de la evaluación económica de los escenarios simulados	314
9	Conclusiones	315
9.1	Conclusiones generales	317
9.2	Conclusiones arquitectónicas	317
9.3	Conclusiones relacionadas con los EECN	317
9.4	Conclusiones tecnológicas	318
9.5	Conclusiones industriales	318
9.6	Conclusiones de simulación	318
9.7	Conclusiones económicas	319
10	Conclusions	321
10.1	General conclusions	323
10.2	Architectural conclusions	323
10.3	Conclusions related to NZEB	323
10.4	Technological conclusions	324
10.5	Industrial conclusions	324
10.6	Simulation Conclusions	324
10.7	Economical conclusions	324
11	Futuras líneas de investigación	327
	Referencias bibliográficas	331
	Anexos	
Anexo A	Elementos del montaje experimental	353
A.1	Bomba circuladora principal (B1)	353
A.2	Bomba circuladora secundaria (B2)	354
A.3	Electroválvulas	355
A.4	Depósito de acumulación	356
A.5	Disipador	356
A.6	Resistencia eléctrica calefactora	357
Anexo B	Elementos del sistema domótico de control	359
B.1	Componentes del primer prototipo	359
B.1.1	Placa controladora	359

B.1.2	Sensores de temperatura	366
B.1.3	Placa registradora de datos	370
B.1.4	Placa de relés	371
B.1.5	Placa de conexiones	375
B.2	Componentes adicionales del segundo prototipo	375
B.2.1	Placa controladora	375
B.2.2	Arduino Mega ADK	376
B.2.3	Módulo de 8 relés	380
B.2.4	Pantalla LCD	380
B.3	Componentes adicionales del tercer prototipo	382
B.3.1	Fotorresistencia	382
B.3.2	Medidor de nivel	385
B.3.3	Placa reguladora de motor	385
Anexo C	Patentes	397
C.1	Sistema de control domótico programable con capacidad de gestión energética para cerramiento activo transparente o translúcido	397
C.2	Cerramiento dinámico para edificaciones	401
Anexo D	Propiedades de los acristalamientos empleados en la simulación	403
D.1	Ventana con vidrio sencillo claro	403
D.2	Ventana con vidrio sencillo reflectante	407
D.3	Ventana con vidrio laminar claro - SGG Stadip Clear 44-1	411
D.4	Ventana con vidrio doble claro 6/8/6	415
D.5	Ventana con vidrio doble de control solar 6/8/6	419
D.6	Ventana equivalente a vidrio activo	423
Anexo E	Resultados experimentales	427
E.1	Ensayo 24/05/2013 - Funcionamiento continuo	429
E.2	Ensayos en Condiciones de demanda de calefacción	430
E.2.1	Ensayos - Condiciones de demanda de calefacción - Radiación alta . . .	430
E.2.2	Ensayos - Condiciones de demanda de calefacción - Radiación media .	432
E.2.3	Ensayos - Condiciones de demanda de calefacción - Radiación baja . .	433
E.2.4	Ensayo 31/05/2013 vidrio activo triple - vidrio sencillo	435
E.3	Ensayos en condiciones de demanda de refrigeración	436

E.3.1	Ensayo 29/08/2013 - Vidrio activo con cámara de agua y cámara de aire - Vidrio sencillo	436
E.3.2	Ensayo 30/08/2013 - Vidrio activo con cámara de agua y cámara de aire - Vidrio sencillo	437
Anexo F Datos de funcionamiento de la bomba de calor		
	Trane GEH035	439
F.1	Datos para funcionamiento en modo calefacción	439
F.2	Datos para funcionamiento en modo refrigeración	443
Anexo G Datos de funcionamiento de la bomba de calor		
	Trane GEH035	451
G.1	Datos para funcionamiento en modo calefacción	451
G.2	Factores de corrección de datos para funcionamiento en modo calefacción según la temperatura del aire	455
G.3	Datos para funcionamiento en modo refrigeración	459
G.4	Factores de corrección de datos para funcionamiento en modo refrigeración según la temperatura del aire	463
Anexo H Ecuaciones empleadas en la simulación del taller		467
H.1	Ecuaciones de Control de los Modos - Escenario 4-1	467
H.2	Ecuaciones de Control de los Modos - Escenario 4-2	471
Anexo I Evaluación económica de los escenarios simulados		475
I.1	Evaluación económica del Escenario 2	475
I.2	Evaluación económica del Escenario 3-1	479
I.3	Evaluación económica del Escenario 3-2	483
I.4	Evaluación económica del Escenario 4-1	487
I.5	Evaluación económica del Escenario 4-2	491

Índice de figuras

1.1	Distribución del consumo energético en edificios en España. Fuente: IDAE . . .	9
1.2	Edificios con grandes superficies acristaladas	12
1.3	Edificios en altura con grandes superficies acristaladas. Fuentes: (a) Blog Play and tour [14], (b) y (c) Foster and partners [15],y (d) Bigapplesecrets [16] . .	13
1.4	Consumo de energía primaria en calefacción y refrigeración en el sector doméstico según zona climática. Fuente: IDAE [3]	16
1.5	Sistemas de monitorización y control para un EECN. Fuente: Fuente: Kolokotsa et al. [37]	18
3.1	Clasificación de fachadas según su tecnología	30
3.2	Clasificación de fachadas activas según su estrategia de operación	30
3.3	Solar House MIT IV. Fuente: MIT [54]	31
3.4	Esquema de fachada solar. Fuente: Matuska y Sourek [56]	32
3.5	Sistema de Tubo Termosifón Bifásico. Fuente: Zhang et al. [57]	33
3.6	Sistema de fachadas activo para intercambio de energía. Fuente: Ibrahim [59] .	33
3.7	Colector solar térmico integrado en fachada. Fuente: Ji et al. [60]	34
3.8	Muro híbrido con aislamiento transparente (TIHW). Fuente: Rockendorf et al. [61]	34
3.9	Heat insulation solar glass. Fuente: Cuce y Riffat [68]	35
3.10	Sistema de fachada con circulación de aire forzado. Fuente: Corgnati et al. [72]	37
3.11	Fachada asociada a sistema de acondicionamiento. Fuente: Corgnati. [72] . . .	38
3.12	Sistema de fachada activa con persiana y ventilación. Fuente: Lollini et al. [73]	39
3.13	Exterior (izquierda) y sección (derecha) de la célula de ensayo de la fachada inteligente. Fuente: Liu et al. [74]	39

3.14 Montantes activos en el IW. Fuente: (a) Gartner [77] y (b) Gong et al. [78] . . .	40
3.15 Esquema de la instalación de los montantes activos. Fuente: Web Carnegie Mellon [79]	41
3.16 Circuito secundario de la instalación de los montantes activos. Fuente: Web Carnegie Mellon [79]	41
3.17 Detalles de los montantes activos. Fuente: Gong et al. [78]	42
3.18 Controles del sistema de acondicionamiento. Fuente: Web Carnegie Mellon [79]	42
3.19 Subsistemas de control del IW. Fuente: Web Carnegie Mellon [79]	43
3.20 Fachadas Multifuncionales. Fuente: Platzer [62]	43
3.21 Flujos de energía en una ventana con cámara de agua circulante. Fuente: Chow et al. [64]	44
3.22 Montaje experimental de acristalamiento con cámara de agua (izquierda) y su esquema correspondiente (derecha). Fuente: Li [82]	45
3.23 Ventana vascular vacía (izqda) y llena de agua (dcha). Fuente: Hatton et al. [83]	45
3.24 Envolvente activa y sus componentes. Fuente: Carbonnier [84].	46
3.25 Fachada activa y su controlador. Fuente: Carbonnier [84].	46
3.26 Modos de funcionamiento de la fachada. Fuente: Carbonnier [84].	46
3.27 Montajes experimentales de ventanas con cámara de agua circulante. Fuente: Giménez-Molina [41] (a) y Chow y Li [88] (b).	50
3.28 Sistema de acristalamiento activo asociado a instalación de ACS. Fuente: Chow et al. [87]	50
3.29 Esquema de una instalación de acristalamientos activos con cámara de agua circulante. Fuente: Gil-López et al. [43]	51
3.30 Esquema de una instalación de acristalamientos activos con cámara de agua circulante con apoyo auxiliar eléctrico. Fuente: Gil-López et al. [44]	51
3.31 Taller situado en la ETS Arquitectura de Madrid. Fuente: Archivo propio . . .	52
3.32 Fachadas propuestas en FluidGlass. Fuente: Stopper [93] y Gstoehl [94]	54
3.33 Prototipos de casas solares desarrolladas por el MIT. Fuente: MIT [54]	56
3.34 Esquema operación de la MIT Solar House I. Fuente: Whillier [100]	57
3.35 Controladores en sistemas de acondicionamiento solar. Fuente: Duffie y Beckmann [98]	58
3.36 Implementación del control por realimentación en un sistema solar. Fuente: Orbach et al. [106]	60
3.37 Esquema de control del sistema solar doméstico. Fuente: Nhut [113]	62
3.38 Sistema de control digital propuesto. Fuente: Johnson [115]	63
3.39 Sistema de gestión de energía solar. Fuente: Moen [117]	64

3.40 Organigrama del submódulo de organización. Fuente: Murray et al. [119] . . .	65
3.41 Esquema de microordenador propuesto. Fuente: Waddington [122]	67
3.42 Esquema del sistema de control para un sistema híbrido. Fuente: Santamouris y Lefas [123]	67
3.43 Diagrama de bloques del controlador para un sistema solar activo distribuido. Fuente: Lefas [124]	68
3.44 Diagrama esquemático del sistema solar equipado con el FTC. Fuente: Hag- highat [125]	69
3.45 Esquema del sistema de control para colector solar. Fuente: Muralidhar [112] .	69
3.46 Esquema del montaje experimental equipado con control predictivo y depósito segmentado. Fuente: Proud'homme et al. [128]	70
3.47 Aplicaciones de controladores en un sistema de calefacción solar. Fuente: Liu [74]	71
3.48 Diagrama de bloques del sistema de control con seguidor del MPPT. Fuente: Huang [135]	72
3.49 Interior de la sede del HSBC en Hong Kong. Fuente: Foster and Partners [15] .	73
3.50 Esquema de control de aire acondicionado mediante microprocesador. Fuente: Sakamoto [138]	74
3.51 Prototipo de instalación de sistema solar asociado a una bomba de calor. Fuen- te: Sporn et al. [145].	76
3.52 Diagrama del prototipo de instalación de bomba de calor asociada a un sistema solar. Fuente: Sport y Ambrose [145]	77
3.53 Esquema del sistema de bomba de calor acoplada a un sistema solar. Fuente: Sakai et al. [146]	78
3.55 Diagrama de la instalación de agua residuales asociada a una bomba de calor. Fuente: Baek et al. [157]	81
3.56 Diagrama de la instalación de bomba de calor asistida por energía solar. Fuente: Chaturvedi et al. [159]	82
3.57 Filosofía del modelo de decisión asistido. Fuente: Doukas et al. [177]	87
3.58 Fachada sur del Instituto del Mundo Árabe en París. Fuente: Wikiarquitectura	88
3.59 Panel de la fachada sur del Instituto del Mundo Árabe. Fuente: Meagher [184]	88
3.60 Torres Al Bahar, Abu Dhabi. Fuente: Wikiarquitectura [185]	89
3.61 Sistema de aire acondicionado para invernaderos. Fuente: Chiapale et al. [190]	91
3.62 Esquema y valores de temperatura del sistema. Fuente: Chiapale et al. [190] .	92
3.63 Sistema de utilización de energía geotérmica en estructuras de doble capa. Fuente: Somos et al. [191]	92

3.64 Ventana equipada con vidrio activo con cámara de agua circulante. Fuente: Seemann [192]	93
3.65 Patentes de ventana con cámara de agua en circulación. Fuente: Belletti [193] y McKee. [194]	94
3.66 Acristalamiento y sistema de control asociado. Fuente: Lauret et al. [195] . . .	94
3.67 Diferentes productos de la empresa IntelliGLASS. Fuente: IntelliGLASS [196] . .	95
3.68 Ejemplo de circuito hidráulico de instalación. Fuente: IntelliGLASS [196] . . .	96
3.69 Componentes de la plataforma Conectto. Fuente: Web Conectto [197]	97
3.70 Controlador y prototipo de vidrio de IntelliGLASS. Fuente: Archivo propio [196]	97
3.71 Edificio Bioincubadora de empresas - UCLM. Fuente: Intelliglass [196] . . .	98
3.72 Aulario polivalente Facultad de periodismo - UCLM. Fuente: Intelliglass [196] .	99
3.73 Componentes de la instalación del Aulario Polivalente Periodismo - UCLM. Fuente: Intelliglass [196] y Archivo propio	99
3.74 Edificio Polivalente en Madarcos (Madrid). Fuente: IntelliGLASS [196]	100
3.75 Despacho en la ETS Ingeniería Aeronáutica. Fuente: IntelliGLASS y Archivo Propio [196]	101
3.76 Fachada activa principal del edificio <i>BIQ-Haus</i>	102
3.77 Detalle de la fachada Solarleaf. Fuente: Colt Limited GmbH [201]	103
3.78 Elementos del edificio BIQ-Haus. Fuente: Colt Limited GmbH [201] y Rockwell Automation [200]	104
3.79 Posición en el mercado de los principales fabricantes de sistemas de gestión energética para edificios. Fuente: Navigant Research [202]	106
3.80 Controlador Schneider Electric Modicon M171P. Fuente: Schneider Electric [203]	106
3.81 Placas adaptadoras entre diferentes protocolos/buses y Arduino. Fuente: Co-oking Hacks [205] y Sparkfun [206].	107
3.82 Industrino y sus posibles conexiones. Fuente: Industrino [204]	108
3.83 Controladores Siemens. Fuente: Siemens [205]	109
3.84 Placa interfaz KNX/TP-UART 2. Fuente: Opternus Components [207]	109
4.1 Diferentes elementos de fachada ensayados en módulos a escala. Fuente: (a) Grimmer et al. [222], (b) Ahmad [223], (c) Piccolo [224], (d) Carbonari [225], (e) Intelliglass [196] y (f) Carbonnier [84].	118
4.2 Vista frontal de la instalación experimental. Fuente: Archivo propio	120
4.3 Módulos de ensayo. Fuente: Archivo propio	120
4.4 Componentes de la instalación. Fuente: Archivo propio	121
4.5 Construcción unidad vidrio. Fuente: Archivo propio	122
4.6 Esquema del cerramiento dinámico. Fuente: Pat. Cerramiento Dinámico [228] .	122

4.7 Pruebas preliminares. Fuente: Archivo propio	126
4.8 Primer prototipo del sistema de control. Fuente: Archivo propio.	127
4.9 Placa Arduino Uno. Fuente: Arduino [208].	127
4.10 Sensor temperatura DS18B20. Fuente: Archivo propio	128
4.11 Placas empleadas en el primer prototipo. Fuentes: Archivo propio y Seeed Studio [233]	128
4.12 Placas Mama Shield. Fuente: Samurai Circuits [234]	129
4.13 Segundo prototipo del sistema de control. Fuente: Archivo propio	130
4.14 Placa Arduino Mega ADK. Fuente: Arduino [208]	130
4.15 Placa de 8 relés optoaislados. Fuente: Archivo propio	131
4.16 Pantalla LCD 16x2 y detalle de su conexión. Fuente: Archivo Propio	131
4.17 Conectores RJ-11. Fuente: RS Online [236] y Archivo Propio	131
4.18 Tercer prototipo. Fuente: Archivo propio	132
4.19 Componentes del tercer prototipo. Fuente: Archivo propio	133
4.20 Fotorresistencia y su instalación. Fuente: Cooking Hacks [205] y Archivo propio	133
4.21 Sensor de nivel mediante ultrasonidos. Fuente: Web Seeed Studio	134
4.22 Placa reguladora de la bomba. Fuente: DFRobot [238] y Archivo propio	134
4.23 Diagrama de bloques del controlador	135
4.24 Armario de control. Fuente: Archivo propio	137
4.25 Diagrama de conexiones simplificado	138
4.26 Esquema de los módulos que integran el sistema de control. Fuente: Claros-Marfil et. al [240]	139
4.27 Pasos realización de ensayo. Fuente: Archivo propio	141
4.28 Diagrama del montaje experimental	143
4.29 Módulos durante un ensayo. Fuente: Archivo propio	144
4.30 Comparativa entre los valores de temperatura obtenidos por el sistema de control y por los <i>dataloggers</i> HOBO.	146
4.31 Radiación solar sobre el vidrio en los solsticios. Fuente: Archivo propio	147
4.32 Vistas desde la cubierta de la ETS Arquitectura. Fuente: Archivo propio	148
4.33 Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Calefacción - Módulo de referencia	149
4.34 Esquema de circulación del fluido en Modo Demanda de Calefacción	151
4.35 Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Calefacción - Módulo activo	154
4.36 Esquema de circulación del fluido en el Submodo Refrescamiento para Condiciones de Demanda de Refrigeración	158

4.37	Esquema de circulación del fluido en el Submodo Disipación para Condiciones de Demanda de Refrigeración	158
4.38	Esquema de circulación del fluido en el Submodo Enfriamiento Gratuito en Condiciones de Demanda de Refrigeración	159
4.39	Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Refrigeración - Módulo activo	161
4.40	IDE de Arduino. Fuente: Archivo propio	162
4.41	Diagrama de flujo del código de programación	163
4.42	Rotura de vidrios activos. Fuente: Archivo propio	164
4.43	Rotura en edificio real. Fuente: Archivo propio	164
5.1	Esquema bidimensional del módulo (no escalado).	171
5.2	Dominios de la discretización espacial unidimensional	171
5.3	Temperatura del módulo para el sensor T15	172
5.4	Comparación entre temperaturas del modelo y experimentales para el sensor T15	172
5.5	Balance de energía de un vidrio con agua en circulación. Fuente: Chow et al. [65]	176
5.6	Flujos de calor en un vidrio activo con cámara de agua. Fuente: Sierra y Hernández [247]	188
6.1	Módulo solar y su modelo en 3D. Fuente: Archivo propio	198
6.2	Comparación entre diferentes valores de reflectancia	199
6.3	Comparación entre simulación y datos experimentales - Vidrio CAC - Radiación alta	201
6.4	Comparación entre simulación y datos experimentales - Vidrio CAC - Radiación media	202
6.5	Comparación entre simulación y datos experimentales - Vidrio CAC- Radiación baja	203
6.6	Diagrama de flujo de la metodología de búsqueda de vidrios equivalentes . . .	205
7.1	Módulos solares de la instalación experimental. Fuente: Archivo propio	209
7.2	Necesidad de control del vidrio activo	210
7.3	Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Calefacción - Módulo de referencia	211
7.4	Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Calefacción . . .	212
7.5	Temperaturas - Radiación solar alta	214
7.6	Modos de funcionamiento - Radiación solar alta	214
7.7	Influencia radiación solar - Radiación solar alta	215
7.8	Curvas de energía acumulada y cedida - Radiación solar alta	216

7.9	Curvas de consumo nocturno - Radiación solar alta	218
7.10	Temperaturas - Radiación solar media	219
7.11	Modos de funcionamiento - Radiación solar media	219
7.12	Influencia radiación solar - Radiación solar media	220
7.13	Energía acumulada y cedida - Radiación solar media	221
7.14	Consumos - Radiación solar media	221
7.15	Temperaturas - Radiación solar baja	222
7.16	Modos de funcionamiento - Radiación solar baja	223
7.17	Influencia radiación solar - Radiación solar baja	223
7.18	Consumos - Radiación solar baja	224
7.19	Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Refrigeración . .	225
7.20	Temperaturas - Cond. demanda refrigeración	227
7.21	Control prioritario de la eficiencia energética - Cond. demanda refrigeración .	227
7.22	Control prioritario del confort - Cond. demanda refrigeración	228
7.23	Influencia de radiación solar - Cond. demanda refrigeración	229
7.24	Energía captada - Cond. demanda refrigeración	230
7.25	Energía disipada - Cond. demanda refrigeración	230
7.26	Taller Docente situado en la ETS Arquitectura. Fuente: Archivo propio	231
7.27	Planos del taller docente. Fuente: Pérez-Pujazón [85]	232
7.28	Modelo 3D del edificio del taller docente. Fuente: Elaboración propia	234
7.29	Demandas de energía del Taller docente	237
7.30	Esquema de la simulación del taller docente - Escenario 1	240
7.31	Bomba de calor aire-aire empleada en el Escenario 1	240
7.32	Control de temperatura del taller - Escenario 1	241
7.33	Consumos del Taller docente - Escenario 1	242
7.34	Bomba de calor agua-aire empleada en la simulación del Taller docente. Fuente: Trane [260]	243
7.35	Consumos del Taller docente - Escenario 2	246
7.36	Esquema de la simulación - Escenario 2	248
7.37	Consumos del Taller docente - Escenario 3-1	249
7.38	Consumos del taller docente - Escenario 3-2	251
7.39	Activación del vidrio activo mediante el controlador	252
7.40	Variación de U y g mediante activación del vidrio activo	253
7.41	Diagrama de flujo del algoritmo del sistema de control - Escenario 4-1	255
7.42	Consumos del Taller docente - Escenario 4-1	256

7.43	Esquema de la simulación del Taller Docente - Escenario 4-1 - Modos Calefacción y Refrigeración	257
7.44	Diagrama de flujo del algoritmo del sistema de control - Escenario 4-2	259
7.45	Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Acumulación	260
7.46	Esquema de la simulación - Escenario 4-2- Modo Refrigeración	261
7.47	Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Calefacción	262
7.48	Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Calefacción Asistida	263
7.49	Activación del Modo Acumulación por el controlador	264
7.50	Activación del Modo Calefacción / Calefacción Asistida	265
7.51	Consumos del Taller docente - Escenario 4-2	266
7.52	Flujos netos acumulados - Escenario 2	269
7.53	Flujos netos acumulados - Escenario 3-1	270
7.54	Flujos netos acumulados - Escenario 3-2	271
7.55	Flujos netos acumulados - Escenario 4-1	273
7.56	Flujos netos acumulados - Escenario 4-2	276
8.1	Comportamiento vidrio activo según velocidad. Fuente: Pérez-Pujazón [85]	280
8.2	Curva hipotética Q_1 generada por el sistema de control	280
8.3	Curvas hipotéticas Q_1 y Q_2 generadas por el sistema de control	281
8.4	Curvas hipotéticas Q_1 , Q_2 y Q_3 generadas por el sistema de control	281
8.5	Conjunto de curvas hipotéticas generadas por el sistema de control	282
8.6	Efecto de la velocidad del agua sobre la captación de energía. Fuente: Chow [87]	283
8.7	Modos de funcionamiento - Nivel alto radiación solar - 14/02/2013	284
8.8	Modos de funcionamiento - Nivel medio radiación solar - 16/02/2013	284
8.9	Modos de funcionamiento - Nivel bajo radiación solar - 17/02/2013	285
8.10	Influencia radiación solar - Radiación solar alta	287
8.11	Influencia radiación solar - Radiación solar media	287
8.12	Influencia radiación solar - Radiación solar baja	288
8.13	Curvas de energía acumulada y cedida - Radiación solar alta	290
8.14	Energía acumulada y cedida - Radiación solar media	290
8.15	Curvas de consumo nocturno - Radiación solar alta	291
8.16	Curvas de consumo nocturno - Radiación solar media	292
8.17	Curvas de consumo nocturno - Radiación solar baja	292
8.18	Taller Docente situado en la ETS Arquitectura. Fuente: Archivo propio	294
8.19	Consumo de calefacción en los distintos escenarios	296
8.20	Activación de los Modos Calefacción / Calefacción Asistida	297
8.21	Reducción de consumo de calefacción de cada escenario respecto al Escenario 2	298

8.22	Esquema de la simulación del Taller Docente - Escenario 4-1 - Modos Calefacción y Refrigeración	299
8.23	Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Acumulación	300
8.24	Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Calefacción Asistida	301
8.25	Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Calefacción	302
8.26	Aportes de energía sensible a la corriente de entrada de la bomba de calor	305
8.27	Consumos de calefacción según el origen de la corriente de entrada a la bomba de calor	305
8.28	Consumo de refrigeración en los distintos escenarios	306
8.29	Consumos totales en los distintos escenarios	308
A.1	Bomba impulsora Shurflo Nautilus. Fuente: Archivo propio	353
A.2	Bomba circuladora secundaria. Fuente: Grundfos	354
A.3	Componentes de una electroválvula. Fuente: Archivo propio	355
A.4	Depósito de acumulación original y una vez aislado. Fuente: Archivo propio	356
A.5	Disipador empleado para enfriar el agua. Fuente: Archivo propio	357
A.6	Resistencia eléctrica flexible instalada en los módulos de ensayo	357
B.1	Placa Arduino Uno. Fuente: Arduino [208].	359
B.2	Ejemplo de código C en el entorno de desarrollo de Arduino. Fuente: Archivo propio.	361
B.3	Arduino Leonardo equipada con el ATmega32u4. Fuente: Web Arduino [208].	362
B.4	Arduino DUE dotada con el microprocesador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Fuente: Web Arduino [208].	362
B.5	Placa Arduino UNO. Fuente: Arduino [208]	363
B.6	Sensor temperatura DS18B20. Fuente: Archivo propio	366
B.7	Placa datalogger de Adafruit. Fuente: Archivo propio	370
B.8	Placa de relés. Fuente: Seeed Studio [233]	371
B.9	Placas Mama Shield. Fuente: Samurai Circuits [234]	375
B.10	Placa Arduino Mega ADK. Fuente: Arduino [208]	376
B.11	Placa Arduino Mega ADK	377
B.12	Placa de 8 relés optoaislados. Fuente: Archivo propio	380
B.13	Pantalla LCD 16x2 y detalle de su conexión. Fuente: Archivo Propio	381
B.14	Fotocélula. Fuente: Cooking Hacks [205] y Archivo propio	382
B.15	Sensor de nivel mediante ultrasonidos. Fuente: Web Seeed Studio	385
B.16	Placa reguladora de la bomba. Fuente: DFRobot [238]	386
E.1	Funcionamiento continuo de la bomba	429

E.2	Temperaturas en ambos módulos solares con valores de radiación solar alta . .	430
E.3	Temperaturas en ambos módulos solares	431
E.4	Temperaturas en ambos módulos solares con valores de radiación solar media .	432
E.5	Temperaturas en ambos módulos solares con valores de radiación solar baja . .	433
E.6	Temperaturas en ambos módulos solares	434
E.7	Temperaturas en ambos módulos solares	434
E.8	Temperaturas en ambos módulos solares	435
E.9	Tint-Tamb en ambos módulos solares	436
E.10	Tint-Tamb en ambos módulos solares	437

Índice de tablas

1.1	Criterios del Passivhaus Institut. Fuente: PHI [25]	15
3.1	Relación entre radiación solar y mejora mediante control óptimo. Fuente: Winn y Ellsworth [105]	60
3.2	Características del microprocesador empleado por Johnson. Fuente: MOS Technology [116]	64
4.1	Resumen de autores que han empleado módulos de ensayo	117
4.2	Composición de los cerramientos opacos de los módulos de ensayo	120
4.3	Comparación entre los componentes de cada prototipo	135
4.4	Coste los componentes del sistema de control	136
4.5	Componentes del sistema de control	142
4.6	Modos de funcionamiento de los módulos de ensayo. D: diurno, N: nocturno	143
4.7	Submodos de funcionamiento para el Modo Demanda de Calefacción	152
4.8	Valores de consigna - Modo Demanda de Calefacción	152
4.9	Resumen funcionamiento submodos - Modo Demanda de calefacción	153
4.10	Tabla de funcionamiento para el Modo Demanda de Refrigeración	159
4.11	Resumen condiciones funcionamiento submodos - Modo Demanda de Refrigeración	160
4.12	Valores de consigna - Modo Demanda de Refrigeración	160
4.13	Submodos de funcionamiento disponibles del sistema de control	161
5.1	Variables y parámetros del modelo planteado	182
5.2	Subíndices empleados en las ecuaciones	183
5.3	Variables a determinar	190

6.1	Procedimientos y tareas de validación de TRNSYS. Fuente: Web TRNSYS [242].	196
6.2	Elementos empleados en la simulación mediante TRNSYS	197
6.3	Criterios de clasificación de radiación	200
6.4	Variaciones de temperatura obtenidos en la simulaciones	203
6.5	Vidrios equivalentes al vidrio activo obtenidos mediante simulación	204
7.1	Clasificación de niveles de radiación	211
7.2	Temperaturas de consigna - Cond. demanda calefacción	213
7.3	Temperaturas de consigna - Cond. demanda refrigeración	225
7.4	Vidrios empleados en cada escenario	232
7.5	Composición y propiedades de los cerramientos del taller docente	234
7.6	Características de los cerramientos del taller docente	235
7.7	Características de los acristalamientos del taller docente	235
7.8	Superficies acristaladas y relaciones de acristalamiento del taller docente . . .	235
7.9	Condiciones interiores de consigna	235
7.10	Demandas mensuales del taller docente	236
7.11	Demandas anuales Taller	237
7.12	Vidrios empleados en cada escenario	238
7.13	Características de la bomba de calor aire-aire instalada en el Taller	239
7.14	Características de la bomba de calor aire-aire simulada	239
7.15	Consumos mensuales - Escenario 1	241
7.16	Consumos anuales Taller - Escenario 1	242
7.17	Emisiones dióxido carbono - Escenario 1	242
7.18	Características de la bomba de calor agua-aire	243
7.19	Características principales del intercambiador geotérmico	244
7.20	Consumos mensuales del Taller docente - Escenario 2	245
7.21	Consumos anuales Taller - Escenario 2	245
7.22	Emisiones dióxido carbono - Escenario 2	246
7.23	Características de los acristalamientos del taller docente - Escenario 2-2	247
7.24	Consumos mensuales del taller docente - Escenario 3-1	247
7.25	Consumos anuales taller docente - Escenario 3-1	249
7.26	Emisiones dióxido carbono - Escenario 3-1	249
7.27	Características de los acristalamientos del taller docente - Escenario 3-2	250
7.28	Consumos mensuales del taller docente - Escenario 3-2	250
7.29	Consumos anuales del taller docente- Escenario 3-2	251
7.30	Emisiones dióxido carbono - Escenario 3-2	251
7.31	Absorbancias para las capas del acristalamiento activo	254

7.32	Modos de funcionamiento disponibles - Escenario 4-1	254
7.33	Consumos anuales del taller docente - Escenario 4-1	255
7.34	Emissiones dióxido carbono - Escenario 4-1	255
7.35	Consumos mensuales del taller docente - Escenario 4-1	256
7.36	Modos de funcionamiento disponibles - Escenario 4-2	258
7.37	Consumos mensuales del taller docente - Escenario 4-2	265
7.38	Consumos anuales del taller docente - Escenario 4-2	266
7.39	Emissiones dióxido carbono - Escenario 4-2	266
7.40	Variación de consumos anuales e inversión para cada escenario	267
7.41	Parámetros considerados en evaluaciones económicas	267
7.42	Presupuesto de la renovación - Escenario 2	268
7.43	Rentabilidad y recuperación inversión - Escenario 2	269
7.44	Presupuesto de la renovación - Escenario 3-1	270
7.45	Rentabilidad y recuperación inversión - Escenario 3-1	271
7.46	Presupuesto de la renovación - Escenario 3-2	272
7.47	Rentabilidad y recuperación inversión - Escenario 3-2	272
7.48	Rentabilidad y recuperación inversión - Escenario 4-1	273
7.49	Presupuesto de la renovación - Escenario 4-1	274
7.50	Presupuesto de la renovación - Escenario 4-2	275
7.51	Rentabilidad y recuperación inversión - Escenario 4-2	275
8.1	Resultados de ensayos en cond. de demanda de calefacción	279
8.2	Temperaturas máximas del tanque en cond. de demanda de calefacción	285
8.3	ΔT_{efec} en cond. de demanda de calefacción	286
8.4	Consumos de los módulos de ensayo en cond. de demanda de calefacción	289
8.5	Consumos de los módulos de ensayo - Cond. de demanda de calefacción	291
8.6	Rendimientos de los módulos de ensayo en cond. de demanda de calefacción	293
8.7	Escenarios considerados en las simulaciones	294
8.8	Consumos anuales de calefacción	295
8.9	Modos de funcionamiento disponibles - Escenario 4-1	303
8.10	Modos de funcionamiento disponibles - Escenario 4-2	304
8.11	Aportes de energía a la corriente de entrada a la bomba de calor	304
8.12	Consumos anuales de refrigeración de cada escenario	306
8.13	Consumos anuales desglosados de cada escenario	308
8.14	Consumos totales y ahorros según distintas referencias	309
8.15	Emissiones de dióxido de carbono de los escenarios simulados	310
8.16	Consumos anuales e inversión necesaria para cada escenario	311

8.17 Evaluación económica de los escenarios simulados	312
8.18 Parámetros supuestos en la evaluación económica	312
A.1 Principales características de la bomba empleada	354
A.2 Valores de la curva de operación de la bomba	354
A.3 Principales características de la bomba secundaria. Fuente: Grundfos	354
A.4 Datos de consumo eléctrico de la bomba secundaria. Fuente: Grundfos	355
A.5 Principales características de las electroválvulas	355
A.6 Principales características del depósito	356
A.7 Principales características del disipador	357
A.8 Principales características de la resistencia calefactora	358
B.1 Características de la placa Arduino Uno. Fuente: Arduino [208]	360
B.2 Especificaciones técnicas de la placa Arduino Uno. Fuente: Web Arduino [208].	364
B.3 Características del sensor DS18B20. Fuente: Maxim [231]	366
B.4 Características de la placa datalogger. Fuente: Adafruit [232]	370
B.5 Características de la placa de relés. Fuente: Seeed Studio [233]	371
B.6 Características de la placas conectoras. Fuente: Seeed Studio [233]	375
B.7 Características de la placa Arduino Mega ADK. Fuente: Arduino [208]	376
B.8 Características de la placa de relés. Fuente: SainSmart [235]	380
B.9 Características de la pantalla LCD. Fuente: Adafruit [232]	381
B.10 Especificaciones técnicas de la fotorresistencia. Fuente: Advanced Photonix, Inc. [237]	382
B.11 Especificaciones técnicas del sensor de ultrasonidos. Fuente: Adafruit [232] . .	385
B.12 Especificaciones de la placa controladora de motor. Fuente: DFRobot [238] . .	386
I.1 Flujos del Escenario 2	477
I.1 Flujos del Escenario 2 (Cont.)	478
I.2 Flujos del Escenario 3-1	481
I.2 Flujos del Escenario 3-1 (Cont.)	482
I.3 Flujos del Escenario 3-2	485
I.3 Flujos del Escenario 3-2 (Cont.)	486
I.4 Flujos del Escenario 4-1	489
I.4 Flujos del Escenario 4-1 (Cont.)	490
I.5 Flujos del Escenario 4-2	493
I.5 Flujos del Escenario 4-2 (Cont.)	494

Resumen

Este trabajo de investigación plantea el uso de una fachada activa para mejorar la eficiencia energética de los edificios, con objeto de lograr Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN) o *Nearly Zero-Energy Buildings* (NZEB). Más concretamente, la tesis se enfoca en el empleo de un controlador domótico capaz de gestionar un acristalamiento activo con agua en circulación a través de su cámara. El uso de este controlador tiene un doble efecto sobre el edificio: por un lado, da lugar a una reducción de la demanda de energía mediante la atenuación de las cargas solares y, por otro, favorece la disminución del consumo energético mediante el aprovechamiento de la energía captada con un cierto desfase temporal, lo que contribuye a mejorar el rendimiento de los sistemas de acondicionamiento. Este sistema de control domótico, construido *ad hoc* y basado en *hardware* de código abierto, permite monitorizar y controlar un prototipo de acristalamiento activo instalado en un módulo de tamaño reducido, cuyo comportamiento se ha estudiado en condiciones climáticas reales en la ETS de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. A partir de los datos experimentales obtenidos ha sido posible analizar la influencia de este tipo de acristalamientos sobre el ambiente interior del módulo considerado. De manera adicional, y con idea de evaluar el comportamiento de este tipo de acristalamientos activos con agua en circulación en un edificio a escala real, se ha implementado un modelo simplificado de estos acristalamientos activos en el *software* de simulación energética TRNSYS. Dicha implementación ha permitido llevar a cabo una primera comparación, tanto energética como económica, entre el uso de vidrios estáticos y de vidrios activos con cámara de agua circulante con distintos niveles de control.

Abstract

This research work proposes the use of a controlled active façade as one of the elements which can contribute to reach Near Zero-Energy Buildings. More accurately, this thesis focuses on employing a home automation controller able to manage a water-flow glazing. The mentioned water-flow glazing not only reduces energy demand by means of solar loads reduction but also diminishes the energy consumption using the gained energy to increase the performance of conditioning systems with a certain time lag. This home automation system, which has been built *ad-hoc* and is based on open-source hardware, is able to monitor and control a water-flow glazing prototype installed on a small-size test module. The influence of the water-flow glazing on the internal ambient of the test module has been analysed from the gathered data gained under real outdoors weather conditions at ETS of Architecture from Technical University of Madrid. Additionally, in order to study the behaviour of this kind of glazing on a real-scale building, a simplified model of these active glazings has been implemented in TRNSYS building's energy performance software. This implementation lets to carry out a first energetic and economic evaluation between the use of passive glazings and an active water-flow glazing using different control levels.

Rendimientos científico-tecnológicos

La elaboración del presente trabajo de investigación ha dado lugar, de manera directa o indirecta, a las siguientes publicaciones y patentes:

Artículos:

- Claros-Marfil, L. J., Padial, J. F., y Lauret, B. A new and inexpensive open source data acquisition and controller for solar research: Application to a water-flow glazing. *Renewable Energy*, 92:450 – 461, 2016. ISSN 0960-1481.

Comunicaciones a congresos:

- Claros-Marfil, L. J., Pérez-Pujazón, B., Padial, J.F. , Ovando, G., y Lauret, B. Ventanas con cámara de agua circulante en edificios de consumo de energía casi nulo. *Greencities y Sostenibilidad: Inteligencia aplicada a la sostenibilidad urbana*, ISBN-13: 978-84-695-8430-9, Málaga, España, Octubre 2013.
- Claros-Marfil, L. J., Ovando, G., Lirola, J. M., Lauret, B., Padial, J. F. y Zetola, V. Home automation controller for a water-flow window. *Book of Proceedings - Portugal SB13 - Contribution of sustainable building to meet 20 20 20 targets*, 2013.
- Pérez-Pujazón Millán, B., Lauret Aguirregabiria, B., Lirola Pérez J.M., Sánchez González J.C., Castañeda Vergara, E., y Claros-Marfil, L. J. Reducción de la demanda de refrigeración mediante acristalamientos activos con cámara de agua en circulación para su integración en

edificios de consumo de energía casi nula. *XIII Congreso Ibero-Americano de Climatización y Refrigeración*, Madrid, Abril 2015.

Patentes:

- Claros-Marfil, L. J., Lauret Aguirregabiria, B., Padial, J. F., Ovando Vacarezza, G., Lirola Pérez, J.M., Artacho Reinoso, M.J., Zambrana Pineda, A., y Benítez Díaz, F. Sistema de control domótico programable con capacidad de gestión energética para cerramiento activo transparente o translúcido, nº 2 537 130, 2015.
- Lauret Aguirregabiria, B., Lirola Pérez, J.M., Ovando Vacarezza, G., Claros-Marfil, L. J., Pérez-Pujazón Millán, B., Castañeda Vergara, E. y Sánchez-González J.C. Cerramiento dinámico para edificaciones, solicitud nº: P201530064, 2015.

Capítulos de libros

- Lirola, J.M., Lauret, B., Khayet, M., Rashevski, M., Claros, L. J., Pérez-Pujazón, B., y Ovando, G. Energy consumption and thermal behavior of a light construction room-sized test cell. *Construction and Building Research*. Springer, ISBN 978-94-007-7789-7, 2014.

It isn't that they can't see the solution. It is that they can't see the problem.

Gilbert K. Chesterton

Este capítulo presenta un resumen de la situación actual del consumo energético de los edificios. Además, expone brevemente el efecto de los acristalamientos sobre el ambiente interior de los edificios y, finalmente, plantea diferentes consideraciones acerca de la definición de Edificio de Consumo de Energía Casi nulo (EECN), junto con la relevancia del papel que están llamados a desempeñar en ellos los sistemas de control.

1.1. Situación actual del consumo energético de los edificios

La mejora en el nivel de vida de los países desarrollados ha elevado en gran medida el consumo energético de los edificios. En Europa el consumo de los edificios alcanzó el 37 % del total de la energía final consumida en 2004, situándose por encima de sectores como la industria (28 %) o el transporte (32 %) [1].

En España, según el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE) [2], el consumo del sector Edificación (considerando tanto las instalaciones térmicas y eléctricas como los equipamientos habituales de cada sector de actividad), consumió el 26 % de la energía final nacional para usos energéticos en 2010, aunque se espera que estos porcentajes se vean incrementados acercándose a la media Europea una vez que mejore la situación económica [1]. Este consumo se reparte entre un 17,5 % del consumo energético nacional en los edificios de uso doméstico, y un 8,6 % en los edificios destinados a servicios, dentro de los cuales más de dos tercios se destinan a energía térmica, y el resto a energía eléctrica [3]. En cuanto al uso final de la energía consumida, los sistemas de acondicionamiento de calefacción y refrigeración constituyen el 42,5 % y 8,9 % respectivamente, mientras que el agua caliente sanitaria (ACS) representa el 19,6 % (Figura 1.1).

Figura 1.1: Distribución del consumo energético en edificios en España. Fuente: IDAE [3]

En lo que se refiere al consumo mundial, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) [4] pronosticó en 2012 que el consumo de los edificios a nivel global crecerá alrededor de un 34 % en los próximos 20 años, con un promedio de un 1,5 % anual. Además, señaló que en 2030 el consumo de los edificios residenciales será del 67 % del total, frente al 33 % de los no residenciales [1].

A partir de estas predicciones y considerando la creciente escasez de recursos energéticos disponibles unida a su desigual distribución, surge la necesidad de racionalizar su uso en diferentes sectores, entre los que destacan, por su contribución al consumo energético global, los edificios. En Europa, la Directiva Europea relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética (SAVE) [5], que exigía a los estados miembros instaurar y aplicar programas de rendimiento energético en el sector de los edificios, entró en vigor en 1993. Posteriormente, en 2003, le siguió la Directiva de Eficiencia Energética en los Edificios (*Energy Performance Buildings Directive 2002/91/CE*) [6], cuyo objetivo era lograr cumplir el compromiso adquirido por la Unión Europea en la firma del Protocolo de Kioto, consistente en educir en un 20 % de la cantidad de energía primaria consumida con respecto a 1990. Esta directiva puso de manifiesto la necesidad de investigar sobre técnicas y métodos que permitan lograr una disminución de la demanda energética de los edificios en Europa.

En 2010 entró en vigor la versión refundida de la Directiva de Eficiencia Energética en los Edificios (2010/31/UE) o *EPBD re-cast* [7]. Esta nueva Directiva no sólo limita en mayor medida la demanda energética de los edificios, sino que la reduce hasta lograr los denominados Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN), Edificios de Energía Casi Nula o *Nearly Zero-Energy Buildings* (NZEB), definidos como edificios con un nivel de eficiencia energética muy alto que deberán obtener la energía necesaria para su funcionamiento de fuentes renovables en su mayor parte, complementada con fuentes situadas en el entorno, sin que ni esta “mayor parte” ni dicho “entorno” hayan sido definidos concretamente hasta la fecha. Además, esta Directiva establece que a partir del 31 de diciembre de 2020, los edificios de nueva planta construidos deberán ser EECN, reduciéndose el plazo al 31 de diciembre de 2018 en el caso de edificios nuevos ocupados por autoridades públicas. Adicionalmente, esta Directiva atribuye a los sistemas de control de las instalaciones técnicas de los edificios como una de las variables que se deben considerar para lograr optimizar el consumo energético.

Para lograr esos objetivos, en España el IDAE ha propuesto la rehabilitación energética de la envolvente térmica de los edificios existentes, la mejora de la eficiencia energética de las

instalaciones térmicas de los edificios existentes y la construcción o rehabilitación de edificios de consumo de energía casi nulo como las principales medidas orientadas a mejorar la eficiencia energética de en el sector de la edificación. Queda patente, por tanto, la necesidad de mejorar las prestaciones térmicas de la envolvente de los edificios, aprovechar las energías renovables y optimizar el funcionamiento de los equipos de acondicionamiento térmico y ACS como vía esencial para lograr EECN.

Los requisitos legales de eficiencia energética exigibles a los edificios están sufriendo un endurecimiento progresivo. Prueba de ello, es la reciente ratificación por parte de España del Acuerdo de París, alcanzado en diciembre de 2015 en la Conferencia de París sobre el clima (COP21) [8]. Entre los objetivos de este acuerdo destacan el mantenimiento a largo plazo de la temperatura media mundial por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, así como limitar el aumento de temperatura media mundial por a 1,5°C, junto con la limitación de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

Así, el Marco de Política de Energía y Clima 2030 [9], aprobado en 2014 por el Consejo Europeo, tiene como objetivo reducir para ese año el 40 % en la emisión de gases de efecto invernadero, alcanzar una contribución de al menos 27 % de energías renovables al conjunto de la energía final consumida en la UE, así como incrementar al menos hasta el 27 % la eficiencia energética, todo ello respecto a 1990. Además, para el año 2050 la UE aspira a reducir entre 80-95 % de las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a los niveles de 1990. En esta línea, el informe *World building council report - From thousand to billions*, publicado en Mayo de 2017 [10], es incluso algo más ambicioso, al establecer que todos los edificios construidos a partir de 2030 deberían ser de Emisiones Netas Nulas de dióxido de carbono, de manera que se evite la necesidad de futuras rehabilitaciones energéticas. Esta sería una etapa intermedia en la consecución del objetivo final que se establece como lograr que todos los edificios existentes en 2050 fueran edificios con emisiones netas de dióxido de carbono iguales a cero.

1.2. Influencia de los acristalamientos en el ambiente interior de los edificios

El uso de grandes superficies acristaladas ha estado indisolublemente unido al diseño de los edificios más avanzados tanto artística como técnicamente, dotándolos de un gran atractivo estético, y confiriéndoles una imagen de vanguardia (Figura 1.2).

(a) Casa Farnsworth - Mies van der Rohe. Fuente: El Confidencial [11].

(b) Casa de cristal - Philip Johnson. Fuente: The Glass House [12].

(c) Concesionario BMW - Rafael de la Hoz. Fuente: Rafael de la Hoz [13].

Figura 1.2: Edificios con grandes superficies acristaladas

(a) Edif. 30 St Mary Axe

(b) Torre Commerzbank

(c) Torre Hearst

(d) Edif. Seagram

Figura 1.3: Edificios en altura con grandes superficies acristaladas. Fuentes: (a) Blog Play and tour [14], (b) y (c) Foster and partners [15], y (d) Bigapplesecrets [16]

Por otro lado, los avances en las soluciones constructivas acristaladas han hecho que cada vez se haga un uso más extendido de ellas, al ofrecer a los usuarios la posibilidad de disponer de unas condiciones de confort elevadas al mismo tiempo que disfrutan del entorno exterior, lo que de especial interés cuando se considera que los habitantes de una ciudad pasan el 80 % del tiempo en el interior de edificios [17].

Sin embargo, desde el punto de vista energético los vidrios constituyen uno de los puntos débiles de la envolvente del edificio, y generan un elevado impacto en su consumo total [18–20] que oscila entre el 24 % de los países mediterráneos [18] y el 60 % de los países nórdicos [21]. En este sentido, autores como Arasteh, Curcija, Huang, Huizenga y Kohler [22] han puesto de relieve la importancia de evaluar las prestaciones térmicas de los acristalamientos tanto anualmente como en los picos de condiciones extremas de demandas de calefacción y refrigeración.

Por todo ello, los acristalamientos constituyen un elemento clave sobre el que actuar a la hora de mejorar la eficiencia energética de los edificios. Esto se ha abordado en las distintas convocatorias de proyectos de investigación, tanto del extinto Séptimo Programa Marco (7PM) [23] como del nuevo Programa Horizonte 2020 (H2020) de la UE, en el que se ha incluido la mejora de la eficiencia energética de los vidrios como una de las temáticas de interés, con idea de lograr acristalamientos de elevadas prestaciones térmicas y buenas propiedades de transmitancia visible que mejoren tanto el confort como la sostenibilidad ambiental de los edificios.

1.3. Edificios de consumo de energía casi nulo (EECN)

Tal y como se ha indicado anteriormente, la Directiva Europea EPBD 31/2010 [7] actualmente vigente establece que son Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN) aquellos “con un nivel de eficiencia energética muy alto, en los que la cantidad casi nula o muy baja de energía requerida deberá estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de energías renovables producida *in situ* o en el entorno”. Además, la Directiva también indica en su artículo 9 que “cada estado miembro deberá mediante los planes nacionales deberán incluir la aplicación detallada en la práctica por el Estado miembro de la definición de edificios de consumo de energía casi nulo”. Existen, no obstante, otras definiciones complementarias para este tipo de edificios [24].

En este punto es conveniente distinguir entre los conceptos de Casa Pasiva o *Passivhaus* y Edificio de Consumo Casi Nulo (EECN), ya que, aunque ambos se refieren a edificios con un consumo reducido de energía, no son exactamente lo mismo. Una casa o edificio pasivo es aquella que cumple unas ciertas condiciones perfectamente definidas (Tabla 1.1) por el *Passivhaus Institut* (PHI) [25], por otro lado, el concepto de Edificio de Consumo de Energía casi nulo es mucho menos preciso, y se basa únicamente en lo establecido en la Directiva Europea EPBD 31/2010, por lo que puede variar de un país a otro [26].

Tabla 1.1: Criterios del Passivhaus Institut. Fuente: PHI [25]

Variable	Valor
Con. Calefacción (kWh/(año m ²))	15 (10 W/m ² punta)
Con. Refrigeración ¹ (kWh/(año m ²))	15 (10 W/m ² punta)
Con. Total ² (kWh/(año m ²))	120
Estanqueidad	≤ 0,6 ren/h a 50 Pa
Confort térmico	Menos del 10 % horas anuales con T > 25°C

En España actualmente no se han definido explícitamente las condiciones que deberá cumplir un Edificio de Consumo de Energía Casi Nulo, aunque recientemente el RD 564/2017 [27] ha modificado el RD 235/2013 [28] estableciendo que serán EECN los así definidos en el Código Técnico de la Edificación (CTE), por lo que es previsible una rápida actualización de este para incluir dichas características.

¹Este valor no incluye la energía necesaria para deshumidificación.

²Este valor comprende calefacción, refrigeración, ACS y electricidad.

Figura 1.4: Consumo de energía primaria en calefacción y refrigeración en el sector doméstico según zona climática. Fuente: IDAE [3]

En el ámbito Europeo, la Recomendación UE 2016/1318 de la Comisión [29], establece unos valores de referencia aplicables para EECN situados en distintas zonas climáticas, haciendo una proyección de precios y tecnologías para el año 2020. Según el informe *Towards nearly Zero-Energy Buildings - Definition of common principles under the EPBD* [30], Madrid pertenece a la zona climática 2, con un clima similar a ciudades como Lisboa, Marsella o Roma. No obstante, en esta Recomendación se ha obviado la zona climática 2, por lo que no existen unos valores explícitos de referencia para ella. Por tanto, se han considerado los valores de referencia para la Zona Oceánica. Según dicha clasificación, los valores de referencia para un edificio de oficinas oscilarían entre los 40-55 kWh/(m² año) de energía primaria neta, con un uso de energía primaria de 85-100 kWh/(m² año) que deberá estar cubierto por 45 kWh/(m² año) procedentes de fuentes renovables *in situ*.

En el proceso de diseño de edificios EECN, debe tenerse presente lo indicado por autores como Evola, Margani y Marletta [31], quienes resaltan el hecho de que en los países mediterráneos, donde las necesidades de refrigeración superan, por norma general, a las de calefacción, el diseño de EECN no puede basarse únicamente en un aumento de los niveles de aislamiento, sino que es necesario gestionar apropiadamente las ganancias solares y las cargas internas. A su vez Carrilho da Graça, Augusto y Lerer [32] apuntan que, para lograr un EECN, es necesario

el aprovechamiento óptimo de las energías renovables y su correcta gestión, de tal manera que se optimice el consumo energético sin disminuir, o incluso mejorando en lo posible, el confort de sus ocupantes.

En lo que se refiere a la integración de las energías renovables en los edificios, Chwieduk [33] plantea la necesidad de emplear tecnologías innovadoras para alcanzar reducciones significativas de consumo energético, para ello propone la integración de las energías renovables en las estructuras de los edificios. Por otro lado, Tsalikis y Martinopoulos [34] muestran el potencial de los sistemas solares para lograr convertir un típico edificio residencial griego de 120 m² ubicado en cada una de las 4 zonas climáticas de Grecia, y diseñado de acuerdo con la regulación griega de eficiencia energética [35], en un EECN. Para ello llevan a cabo la simulación de un sistema combinado de calefacción y ACS acoplado a una pequeña instalación fotovoltaica. Los resultados obtenidos indican que, en todos los casos, los sistemas solares son capaces de cubrir más del 76 % de la demanda de energía primaria, y que en algunos casos pueden llegar al 97 %.

Las mejoras de la envolvente del edificio y del grado de confort interior no sólo influyen positivamente en el rendimiento energético del edificio sino que , además, constituyen una de las principales categorías propuestas por Hartkopf, Loftness, Madhavi, Lee y Shankavaram [36] en la creación entornos innovadores para un lugar de trabajo avanzado. Estas categorías pueden resumirse en cuatro grupos principales:

1. innovaciones de la envolvente.
2. innovaciones relacionadas con la ventilación natural e iluminación.
3. innovaciones relacionadas con acondicionamiento térmico (HVAC), incluyendo aproximaciones al control local y la mejora del contacto con el medio ambiente.
4. innovaciones de los sistemas interiores relacionados con la mejora de la calidad térmica, acústica, visual y de calidad de aire interior.

Con respecto al papel que los sistemas de control, los modelos térmicos y los sistemas de gestión de la energía tendrán a la hora de alcanzar EECN (Figuras 1.5a y 1.5b), autores como Kolokotsa, Rovas, Kosmatopoulos y Kalaitzakis [37] destacan como uno de los aspectos más relevantes de los sistemas de gestión de energía inteligente su actuación prácticamente en tiempo real, de forma que sean capaces de lograr el ajuste óptimo entre producción y demanda.

(a) Esquema de un sistema de control

(b) Infraestructura de un sistema de monitorización

Figura 1.5: Sistemas de monitorización y control para un EECN. Fuente: Fuente: Kolokotsa et al. [37]

Resulta evidente, por tanto, que la respuesta al reto de construir edificios que consuman casi la misma energía que producen no puede lograrse empleando una única vía, sino que, probablemente, vendrá dada por la suma de diferentes estrategias aplicadas de manera conjunta. Entre ellas destacan las relacionadas con el desarrollo de nuevos procesos constructivos y tecnologías aplicados a la arquitectura. Es decir, dicha respuesta deberá estar basada en el empleo de sistemas tecnológicamente avanzados que permitan desarrollar una arquitectura de

altas prestaciones convenientemente operada mediante los Sistemas de Gestión de Edificios o *Building Management Systems* (BMS) [33], de tal manera que los distintos elementos que conforman los edificios, tales como la envolvente y las instalaciones, estén interconectados entre sí.

1.4. Relevancia del control en los Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo

La Comunicación 2016(51) del Consejo [38] ha puesto de relieve la importancia del papel que los sistemas de automatización y control están llamados a desempeñar en los EECN. En este sentido se ha desarrollado el estándar Europeo EN 15232 : *Energy performance of buildings - Impact of Building Automation, Control and Building Management* - como un conjunto de normas CEN (*European Committee for Standardization*) elaboradas con el objetivo de apoyar la directiva de eficiencia energética de los edificios y de potenciar una mejora el rendimiento de los edificios en la UE. Este estándar, redactado en España como norma UNE-EN 15232:2014 [39], va a permitir evaluar el impacto de los Sistemas de Automatización y Control (*Building Automation and Control System - BACS* -) del edificio mediante la definición de metodologías aplicables a diferentes tipos de edificios. Entre otros aspectos, el estándar especifica lo siguiente [40]:

- una lista estructurada de las funciones de los sistemas de control, automatización y gestión técnica del edificio que pueden afectar a su rendimiento energético.
- un método para definir los requisitos mínimos en respecto a los sistemas de control, automatización y gestión técnica del edificio, que permita su implementación en edificios con distintos niveles de complejidad.
- varios métodos detallados para evaluar el impacto de los sistemas de control automatización y gestión técnica en un edificio dado, de manera que sea posible introducirlos en los cálculos de los indicadores y evaluadores de los estándares relacionados con el rendimiento de los edificios que sean de aplicación en cada caso.
- un método simplificado que permita obtener una primera estimación del impacto de las funciones de control, automatización y gestión técnica sobre el rendimiento energético de edificios tipo.

Hipótesis y objetivos

The scientist is not a person who gives the right answers, he is one who asks the right questions.

Claude Levi-Strauss

Este capítulo expone la hipótesis de partida que da lugar al presente trabajo de investigación. Asimismo se enumeran los objetivos principales y secundarios que se han abordado durante su realización, junto con su justificación.

2.1. Hipótesis de partida

La hipótesis que plantea este trabajo de investigación es que resulta posible controlar de manera óptima un acristalamiento activo con cámara de agua circulante, para su uso en Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo, mediante el empleo de un sistema de control domótico que gobierne su funcionamiento. Para ello, el sistema de control será capaz de alternar entre los diferentes modos de funcionamiento programados en función de los valores que tomen las variables medidas en cada instante.

2.2. Objetivo principal

El objetivo principal de la tesis es determinar la contribución de un sistema de control domótico programable, basado en hardware de código abierto u *open source*, y destinado a optimizar el funcionamiento de una acristalamiento activo con cámara de agua circulante en la cámara, a Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN), especialmente cuando opera en combinación con sistemas de acondicionamiento de alta eficiencia como bombas de calor.

Este sistema de control propuesto deberá cumplir, al menos, los siguientes requisitos:

1. Ser capaz de actuar sobre el caudal circulante por la cámara a partir del valor de consigna establecido según un determinado algoritmo de control.
2. Ser capaz de operar mediante un modo de control manual.
3. Poder integrarse en un sistema de control más complejo.
4. Tener un coste reducido.

2.3. Objetivos secundarios

El objetivo principal de la tesis, puede desglosarse para su cumplimiento en los siguientes objetivos particulares:

1. Diseñar y construir un sistema de control domótico que permita gestionar un acristalamiento activo con agua circulante.
2. Demostrar experimentalmente la viabilidad del control propuesto.
3. Determinar los componentes mínimos necesarios del sistema de control.
4. Determinar los ahorros energéticos posibles asociados al sistema de control domótico en módulos a escala bajo distintos escenarios de operación.
5. Plantear las posibilidades de simulación del sistema activo con cámara de agua en circulación según el software disponible actualmente.
6. Llevar a cabo una evaluación económica preliminar de la implementación de un controlador destinado a gestionar un acristalamiento activo con cámara de agua en circulación en un edificio a escala real.
7. Cuantificar los ahorros obtenidos mediante la integración del acristalamiento con cámara de agua con sistemas activos de alto rendimiento, tales como bombas de calor, en un recinto real y optimizar su funcionamiento.
8. Poner a disposición de la comunidad científica internacional los resultados alcanzados mediante su difusión en revistas y congresos en el área de la energía, la ingeniería y la arquitectura.

2.4. Justificación

Una vez constatado en el Capítulo 1.- Introducción, el consumo actual de los edificios así como la necesidad de mejorar su eficiencia energética en general, y la de los acristalamientos en particular, se plantea el uso de un acristalamiento activo con agua en circulación, y gestionado

a partir de un controlador basado en *hardware* de código abierto, con objeto de optimizar su funcionamiento.

Tal y como se verá en el Capítulo 3.- Estado del arte, existen diferentes autores que ya han puesto de relieve los potenciales ahorros que ofrecen los acristalamientos activos con cámara de agua en circulación [41–44].

No obstante, aunque estos autores plantean la conveniencia de controlar estos acristalamientos activos, ninguno de ellos ha presentado una implementación específica de tales sistemas de control. Ante esta situación, el presente trabajo propone la incorporación de un sistema de control domótico que permita el funcionamiento autónomo de un acristalamientos con cámara de agua circulante, a partir de la propuesta teórica original de Millán-Anglés y Lauret [45].

Estado del arte

Any fool can know, the point is to understand.

Albert Einstein

En el presente trabajo se ha optado por dividir el estado actual de la tecnología en dos apartados diferentes. Así, este capítulo presenta por un lado el Estado de la Investigación, que engloba los últimos avances en los temas de interés para la tesis llevados a cabo por la comunidad investigadora. Estos serían, por tanto, los sistemas más avanzados con los que podría equiparse un edificio experimental en la actualidad.

Por otro lado, se presenta el Estado de la Técnica, que repasa los últimos avances disponibles técnicamente dentro de las diferentes áreas de interés analizadas, y describe los sistemas con los que podría equiparse un edificio técnicamente avanzado actualmente.

3.1. Estado de la investigación

3.1.1. Fachadas solares térmicamente activas

Tradicionalmente, la función de la fachada en los edificios ha estado dotada de un carácter estático, orientado únicamente a separar el ambiente interior del entorno exterior, y proporcionar a los habitantes del edificio protección, confort e intimidad. Frente a este enfoque de la fachada como un elemento estático o pasivo, se plantea una arquitectura activa o inteligente orientada a alcanzar edificios de prestaciones avanzadas, en línea con la propuesta de Le Corbusier de concebir los edificios como “máquinas para vivir”.

Por lo general, los acristalamientos resaltan la belleza y la elegancia de los edificios, lo que contribuye a aumentar su atractivo, y les aportan un cierto valor intangible. No obstante, es sabido que los edificios con elevados grados de acristalamiento se ven sometidos a enormes ganancias térmicas en verano y considerables pérdidas en invierno. Para reducirlas, generalmente se hace uso de diferentes soluciones de vidrios con prestaciones mejoradas frente a vidrios sencillos o unidades de vidrio aislante con cámara de aire. Entre este tipo de fachadas de características mejoradas se encuentran las denominadas fachadas inteligentes, también conocidas como fachadas solares, activas o dinámicas. Este tipo de fachadas se caracterizan por ser capaces de contribuir de manera activa a la mejora de la eficiencia energética del edificio y de sus condiciones de confort interiores, pudiendo hacer que el ahorro energético de un edificio se vea incrementado hasta en un 40 % [46]. Además, su funcionamiento puede verse optimizado cuando son gestionadas de manera apropiada por un sistema de control [47].

Existe una amplia variedad de fachadas activas o dinámicas destinadas a mejorar la ventilación, el acondicionamiento térmico, el sombreado o las condiciones de iluminación interior de los edificios [48, 49]. El concepto que subyace bajo este tipo de fachadas es el de poder modificar el ambiente interior del edificio al mismo tiempo que se reduce su consumo energético [46, 50]. Aunque no se trata de una idea nueva, pues ya fue planteada conceptualmente por Le Corbusier en forma de La Pared Neutralizante o *Le mur neutralisant* en la Ciudad Refugio de París [51], este tipo de fachadas han sido ampliamente desarrolladas en los últimos años.

Atendiendo a su nivel de transparencia, autores como Quesada, Rouse, Dutil, Badache y Hallé [48] clasifican las fachadas solares en opacas y transparentes o translúcidas. Según esta clasificación, las fachadas opacas son aquellas que absorben y reflejan la radiación solar

pero, al contrario que las transparentes o translúcidas, no permiten que la radiación solar las atraviese y llegue al interior del edificio de forma directa. Estos autores subdividen ambos grupos en fachadas activas y pasivas (Figura 3.1), entendiendo que una fachada se considera como activa “cuando transforma la radiación solar incidente en electricidad (...) o transmite la energía térmica en el edificio mediante el empleo de equipos eléctricos o mecánicos” [48, 52].

Figura 3.1: Clasificación de fachadas según su tecnología

Frente a la definición anterior proporcionada por Quesada et al. [48, 53], existen fachadas que, aunque no transforman la energía solar incidente en energía útil para el edificio, son capaces de mejorar las condiciones de confort interiores y el consumo energético mediante el control del sombreado y la ventilación. Por tanto, desde un punto de vista energético, al hablar de fachadas activas resulta de mayor interés distinguir entre aquellas fachadas que disminuyen las ganancias solares, bien mediante el control del sombreado o la ventilación, y las que, además de reducir estas ganancias, transforman de manera efectiva parte de la radiación solar en energía neta útil para su aprovechamiento en el edificio (Figura 3.2).

Figura 3.2: Clasificación de fachadas activas según su estrategia de operación

3.1.1.a. Fachadas que aportan energía neta útil al edificio

Fachadas opacas

La idea de utilizar parte de la envolvente de los edificios como un colector solar térmico no es un concepto nuevo, siendo propuesta por primera vez en 1958 por el ingeniero japonés Masanosuke Yanagimachi en la Yanagimachi solar House II, construida en Tokio. Más tarde, en 1959, L.B. Andersson y A. Whillier, del Departamento de Arquitectura del Massachusetts Institute of Technology (MIT), diseñaron y construyeron la *Solar House MIT IV* (Figura 3.3), en Lexington (Massachusetts). Esta vivienda disponía de un colector de unos 60 m² (640 ft²) con una inclinación de 60°, siendo capaz de suministrar hasta el 57 % de la energía necesaria para la calefacción durante el invierno.

Figura 3.3: Solar House MIT IV. Fuente: MIT [54]

En esta línea, Hestnes [55] propone dotar a las fachadas de un carácter multifuncional, integrando en ellas colectores solares tanto térmicos como fotovoltaicos. De esta forma los colectores ejercen un rol doble, lo que permite desplazar a otros elementos constructivos y contribuir a hacer económicamente factibles estas fachadas. El planteamiento de favorecer la integración arquitectónica de los sistemas solares a partir de la disminución sus costes totales ha dado lugar a fachadas activas que emplean Sistemas Solares Térmicos Integrados en el edificio o *Building-Integrated Solar Thermal* (BIST). Este tipo de sistemas son concebidos como “la aplicación de un equipo colector solar a la fachada de un edificio de manera que este ejerce una doble función: fachada y captador de energía solar” [48].

Una fachada activa basada en el fundamento anterior es la propuesta por Matuska y Sourek [56] (Figura 3.4). Dichos autores afirman que incrementando en un 30 % el área de los colectores de las fachadas solares puede lograrse que la fracción solar¹ alcance el 60 % del valor obtenido a partir de los colectores tradicionales inclinados 45°, y que podrían alcanzarse a una fracción solar del 70 % con un área equivalente a los colectores tradicionales gracias a su mayor grado de utilización a lo largo del año. Además, es interesante destacar que, según estos autores, su instalación prácticamente no afecta a las temperaturas interiores del edificio si se emplea un nivel de aislamiento apropiado.

Figura 3.4: Esquema de fachada solar. Fuente: Matuska y Sourek [56]

Otro sistema integrado en fachadas opacas, capaz de mejorar la eficiencia de los edificios mediante reducción de pérdidas, es el basado en Tubos Termosifón Bifásicos Embebidos en los muros o *Wall Implanted Heat Pipes* (WIHP), propuesto por Zhang Sun y Duan [57]. Este tipo de fachada emplea un sistema de control basado en una válvula que permite la circulación del fluido por las tuberías capilares integradas en ella. Su funcionamiento puede explicarse a partir de la Figura 3.5. El sistema consta de una serie de conducciones capilares embebidas tanto en la parte más exterior como en la parte más inferior de las fachadas norte y sur. En invierno, cuando la temperatura de la superficie exterior supera un cierto valor, el líquido contenido en las conducciones asciende por capilaridad y comienza a evaporarse. Entonces, la válvula de la fachada sur se abre y el fluido, una vez que se ha evaporado, pasa desde el exterior al interior donde se condensa, cediendo el calor captado en el exterior. En condiciones de verano, el sistema opera de la misma forma, pero extrayendo de calor desde el interior hacia el exterior en la fachada norte. Los autores indican que los porcentajes de ahorro de energía en condiciones de invierno están directamente relacionados con la cantidad de radiación solar que reciben los muros, de forma que para unas condiciones típicas de invierno en la provincia china de Jinan, con un clima húmedo subtropical según la clasificación climática de Köppen [58],

¹Es la fracción de calefacción requerida por el edificio que es capaz de aportar el sistema de colectores solares.

este sistema es capaz de reducir las pérdidas de energía a través de un muro con orientación sur en un 14,47 %. Para ciudades como Pekín, con un clima continental con verano cálido y húmedo según la clasificación de Köppen, los autores sostienen que se podría alcanzar un ahorro del 19,10 %, y que podría alcanzar un 44,24 % en ciudades chinas más occidentales como Lhasa, que tiene un clima frío semiárido en la clasificación climática de Köppen.

Figura 3.5: Sistema de Tubo Termosifón Bifásico. Fuente: Zhang et al. [57]

En relación con este tipo de sistemas, Ibrahim, Wurtz, Biwolé y Achard [59] proponen un sistema de tuberías empotrados y aisladas mediante aerogel que permite trasladar la energía captada en días soleados de invierno en una fachada sur hasta una fachada norte mediante un sistema de bombeo (Figura 3.6). Para un clima mediterráneo, los autores afirman obtener ahorros de calefacción entre el 28-43 % para viviendas nuevas y del 15-20 % para viviendas ya construidas. En el caso de climas diferentes al mediterráneo los ahorros alcanzados oscilan entre el 6-26 %.

Figura 3.6: Sistema de fachadas activo para intercambio de energía. Fuente: Ibrahim [59]

Explorando este tipo de conceptos, Ji, Luo, Chow, Sun y He [60] han estudiado el uso de un colector solar térmico acoplado a una fachada como sistema dual capaz de proporcionar

ACS en condiciones de verano y acondicionar térmicamente una estancia en condiciones de invierno.

Figura 3.7: Colector solar térmico integrado en fachada. Fuente: Ji et al. [60]

Existen, además, fachadas activas que emplean sistemas solares térmicos integrados en edificios (BIST), como el muro híbrido transparente aislado o *Transparently Insulated Hybrid Wall* (TIHW) propuesto por Rockendorf (Figura 3.8), en el que el fluido es capaz de retirar hasta el 75 % del calor absorbido en un modelo de laboratorio de 1 m² [61], pudiendo llegar al 90 % con determinados cambios constructivos como disminuir la distancia entre los tubos del colector o mejorar su contacto con el muro.

Figura 3.8: Muro híbrido con aislamiento transparente (TIHW). Fuente: Rockendorf et al. [61]

A pesar del aporte neto de energía que estos sistemas de fachadas opacas son capaces de aportar al edificio, presentan un severo condicionante arquitectónico, como es la ausencia de transparencia de la fachada, lo que limita de manera determinante su campo de aplicación.

Fachadas transparentes o translúcidas

Frente a las fachadas opacas antes planteadas, existen diferentes alternativas de fachadas activas transparentes o translúcidas. Una de ellas son las Fachadas Transparentes Ventiladas Mecánicamente o *Mechanically Ventilated Facades* (MVF) que emplean aire en circulación entre los acristalamientos. Más adelante, en el apartado de fachadas que hacen uso de estrategias híbridas, se aportan algunos ejemplos.

Otros tipos de fachadas activas transparentes, que al mismo tiempo pueden actuar como colector solar térmico, son las basadas en cámaras de agua circulante o *water-flow facades* [62–65]. Debido a la relevancia que tienen este tipo de fachadas en la presente Tesis, se analizan con mayor profundidad en el siguiente apartado.

Más recientemente se han desarrollado Vidrios Solares Térmicamente Aislantes (*Heat Insulation Solar Glass* - HISG) (Figura 3.9), que son capaces de actuar como colectores fotovoltaicos integrados en los acristalamientos manteniendo su transparencia [66–68]. Para ello, tanto la película aislante como la capa fotocatalítica, deben afectar lo menos posible a la transparencia del acristalamiento.

Figura 3.9: Heat insulation solar glass. Fuente: Cuce y Riffat [68]

Por su propia naturaleza, el control de las fachadas activas con aporte neto de energía al edificio suele estar integrado en el Sistema de Gestión de Energía del Edificio (*Building Energy Management System* - BEMS), o al menos asociado directamente con el control de sus sistemas de acondicionamiento y ACS. Por ello, a pesar de su importancia para el correcto funcionamiento del elemento activo, queda relegado por lo general a un segundo plano en la mayor parte de las ocasiones en la bibliografía revisada de fachadas solares activas.

3.1.1.b. Fachadas reductoras de ganancias solares

Al contrario de lo que ocurre con las fachadas activas que son capaces de aportar energía neta al edificio, en el caso de las fachadas reductoras de ganancias solares, la conexión de sus sistemas de control automático con el Sistema de Gestión de Energía del Edificio (*Building Energy Management System* o BEMS) no es esencial, por lo dichos sistemas adquieren una mayor relevancia en sí mismos.

Rheault y Bilgen [69] proporcionan algunos ejemplos de este tipo de fachadas, al estudiar los ahorros energéticos de ventanas dotadas con lamas horizontales automatizadas situadas entre dos vidrios de tamaño real en una célula de ensayo. Mediante el movimiento de las lamas se obtienen ahorros energéticos del 30 % en condiciones de invierno y un 50 % en condiciones de verano.

Tzempelikos y Athienitis [70], por su parte, afirman que, mediante el control de los elementos de sombra como una persiana exterior arrollable, pueden llegar a alcanzarse ahorros de hasta el 50 % en la demanda de refrigeración anual. Aunque esto incrementa el consumo debido a la iluminación artificial, el balance global es positivo, dando lugar a ahorros del 12 % en la energía total consumida.

Por otro lado, Kim J., Park, Yeo y Kim K. [71] muestran como mediante el empleo de persianas venecianas automatizadas es posible obtener ahorros energéticos en los sistemas acondicionamiento, además de optimizar los periodos de tiempo en los que debe emplearse luz artificial.

3.1.1.c. Fachadas que emplean estrategias híbridas

En los dos apartados anteriores se han presentado sistemas de fachadas que basan su funcionamiento en limitar las ganancias solares, o que aprovechan la radiación solar para aportar energía al edificio. Sin embargo, existen fachadas que hacen uso de ambas estrategias mediante un enfoque híbrido. Este es el caso del sistema de fachada denominado Fachada Transparente Ventilada Mecánicamente o *Mechanically Ventilated Facade* (MVF) (Figura 3.10), propuesto por Corgnati, Perino y Serra [72]. En este caso, la fachada reduce las ganancias solares mediante una persiana veneciana, y al mismo tiempo hace uso de la radiación solar para pre-calentar el aire destinado al acondicionamiento. La fachada está compuesta por un vidrio exterior (1), una

cámara de aire (2), una persiana veneciana (3), un marco de aluminio (4), un acristalamiento interno (6) y un conducto de aire de salida hacia el equipo de acondicionamiento (7). El recorrido del aire se ilustra mediante las flechas (5).

En condiciones de invierno la fachada puede actuar como colector solar o como un componente de la envolvente con aislamiento térmico mejorado, que se emplea como conducto de salida de retorno de climatización. En el primer caso, que se da principalmente cuando los niveles de radiación solar son elevados, la temperatura del aire que abandona la fachada (T_{exh}) es mayor que la temperatura interior (T_i), y este puede emplearse para pre-calentar el aire de entrada a la unidad de acondicionamiento mediante un recuperador de calor (Figura 3.11a). En condiciones de verano, el aire que sale de la cámara elimina parte de las cargas solares reduciendo las ganancias del ambiente interior (Figura 3.11b). Debido al efecto de enfriamiento del flujo de aire la temperatura interior del acristalamiento se reduce frente a un sistema no ventilado, lo que mejora el confort de los ocupantes. Obviamente, en estas condiciones no tiene sentido hacer pasar el aire de salida por el interior del recuperador, ya que su temperatura es mucho mayor que la temperatura interior. Existen dos parámetros clave que es necesario controlar para el buen funcionamiento del sistema: el caudal de aire que fluye a través de la fachada y la posición de las lamas de la persiana veneciana. Los autores concluyen que este tipo de fachadas tienen un comportamiento mejor que el de fachadas acristaladas convencionales. Sin embargo, no es competitivo frente a fachadas opacas tradicionales que empleen ventanas, ya que durante el verano aparecen problemas de sobrecalentamiento y baja eficiencia, y durante el invierno el pre-calentamiento mediante el recuperador de calor es efectivo solo durante un corto periodo de tiempo.

Figura 3.10: Sistema de fachada con circulación de aire forzado. Fuente: Corgnati et al. [72]

Figura 3.11: Fachada asociada a sistema de acondicionamiento. Fuente: Corngati. [72]

Otros autores como Lollini, Danza y Meroni [73] obtienen ahorros medios del 15 % en la evaluación de un sistema de fachada activo similar al anterior instalado en una célula de ensayo, cuando se compara con una célula de referencia (Figura 3.12b). La fachada propuesta emplea un acristalamiento triple, junto con un sistema dinámico que controla una persiana veneciana situada en la cámara externa y un ventilador en la cámara interna. Ambos elementos son gestionados mediante un sistema de control que los activa según ciertas condiciones de radiación, en el caso de la persianas, o de temperatura, en el caso del radiador. El sistema de control permite además monitorizar los parámetros de funcionamiento de la fachada, así como combinar el uso de la fachada ventilada con el equipo de acondicionamiento térmico, de manera que se aproveche el aire caliente generado en la cámara ventilada.

El efecto del empleo de combinar diferentes estrategias de control de una fachada inteligente (sombreado, activación de lamas, ventilación natural y enfriamiento nocturno) ha sido estudiado por Liu, Wittchen y Heisseberg [74]. Estos autores llevan a cabo un estudio para evaluar sobre el consumo energético de una célula de ensayo que representa un edificio de oficinas (Figura 3.13). Mediante el control de las lamas durante las horas nocturnas se alcanza un ahorro del 17 % comparado con un edificio estático que no esté dotado de tipo de control.

Estos sistemas híbridos tienen la ventaja de aprovechar las dos estrategias anteriormente comentadas, sin embargo presentan como inconveniente una mayor complejidad del sistema de control requerido. Además, al emplear aire como fluido calefactor, ofrecen una menor eficacia por unidad de masa de fluido impulsado que aquellos que emplean agua como agente calefacción.

La bibliografía revisada en este apartado pone de relieve la significativa contribución energética que los sistemas de fachadas activas, y sus sistemas de control automáticos asociados,

pueden aportar tanto a la eficiencia energética de los edificios como al confort de sus ocupantes. Pueden verse otros tipos de fachadas solares térmicamente activas en la extensas revisiones llevadas a cabo por Lai [75], Zhang [52] y O'Hegarty [76].

Figura 3.12: Sistema de fachada activa con persiana y ventilación. Fuente: Lollini et al. [73]

Figura 3.13: Exterior (izquierda) y sección (derecha) de la célula de ensayo de la fachada inteligente. Fuente: Liu et al. [74]

3.1.2. Acristalamientos activos con agua en circulación

En contraposición con las fachadas activas que emplean aire en circulación vistas en el apartado anterior, se han desarrollado fachadas que emplean agua como agente de intercambio de calor. Su principal ventaja es que el agua, debido a su alto calor específico, resulta especialmente apropiada para este fin, mientras que el principal inconveniente es una mayor complejidad de la instalación.

Han sido varios los autores que han propuesto el uso de agua en circulación en acristalamientos. Así, Harktopf et al. [36] hacen referencia a un sistema en el que los montantes de las ventanas (Figura 3.14b) están conectados a conducciones a través de las que fluye agua pre-calentada o pre-enfriada mediante una aleta metálica. Gracias a este sistema es posible emplear toda la superficie de los montantes como elementos radiantes para acondicionar un espacio de trabajo denominado *Intelligent Workplace* (IW), situado en la cuarta planta del edificio Margaret Morrison Carnegie Hall (MMCH) en la Universidad Carnegie Mellon (Pittsburgh). El sistema está inspirado en la patente *Integrated aluminum façade and process for its production* con número EP 0289598 A1 [77], que reivindica un montante hueco, protegido internamente contra la corrosión, a través del cual puede circular un fluido. En la Figura 3.14a se muestra una sección de esta fachada (1) en la que indican algunas de sus partes, como el perfil hueco (51), el hueco interior del montante (54), los vidrios (5) y el aislante (3).

La instalación está compuesta por ventiséis grupos de montantes (Figura 3.15) complementados con paneles radiantes en el techo. Cada grupo se compone a su vez de cuatro o cinco montantes que se controlan mediante una válvula de entrada, una válvula de mezcla y un caudalímetro (Figura 3.16). En las Figuras 3.17a y 3.17b puede observarse un detalle de la sección de los montantes así como su conexión mediante la aleta transmisora de calor con los tubos por los que circula el agua [78].

(a) Detalle de montante hueco

(b) Ventana con montantes activos

Figura 3.14: Montantes activos en el IW. Fuente: (a) Gartner [77] y (b) Gong et al. [78]

Figura 3.15: Esquema de la instalación de los montantes activos. Fuente: Web Carnegie Mellon [79]

Figura 3.16: Circuito secundario de la instalación de los montantes activos. Fuente: Web Carnegie Mellon [79]

El empleo de este tipo de sistema activo elimina la necesidad de emplear equipos mecánicos de acondicionamiento, lo que permite una mayor área de la superficie acristalada, mejora las condiciones de iluminación y aumenta el espacio libre del edificio. Todo ello al mismo tiempo que se mejoran los niveles de confort y se reducen los niveles de ruido.

En lo que respecta al sistema de control, en la instalación original el equipo de acondicionamiento asociado a los montantes activos era gestionado mediante un controlador Johnson Metasys Server [80], no obstante posteriormente se sustituyó por un Siemens Apogee Server. [81] (Figura 3.18). Este sistema de control se subdivide en cinco subsistemas (EN1, EN2 EN3,

(a) Esquema de detalle del montante activo (b) Conexión del montante mediante aleta

Figura 3.17: Detalles de los montantes activos. Fuente: Gong et al. [78]

EN 4 y EN5) (Figura 3.19) siendo el principal (EN1) el que hace de intermediario entre las señales de control recibidas desde el Servidor Apogee y el resto de subsistemas. De esta forma, si la conexión entre el subsistema EN1 y el Servidor Apogee se ve interrumpida, el sistema puede seguir funcionando con normalidad, ya que el primero dispone de una copia del programa de control. Puede apreciarse como, dada la importancia del control en los sistemas activos, es conveniente disponer de sistemas redundantes.

(a) Cuadro de control

(b) Detalle del sistema de control

Figura 3.18: Controles del sistema de acondicionamiento. Fuente: Web Carnegie Mellon [79]

En cuanto a acristalamientos con agua en circulación, Platzer [62] en 2005 va un paso más allá, y desarrolla un prototipo de fachada con control activo de ganancias y pérdidas basado en la circulación de agua a través de las cámaras de los acristalamientos (Figura 3.20a). Más concretamente estudia un elemento con cuatro vidrios (Figura 3.20b), que da lugar a tres cámaras. Las cámaras externas están llenas de líquido, mientras que la interna contiene un gas en su interior. Este autor también introduce, por primera vez, la idea de que el fluido de

Figura 3.19: Subsistemas de control del IW. Fuente: Web Carnegie Mellon [79]

la cámara exterior puede ser coloreado, de manera que se aumente su capacidad de absorber radiación solar, y propone el empleo de esferas de vidrio como elementos separadores de los paneles de vidrio con idea de dotar al conjunto de una mayor resistencia mecánica.

(a) Prototipo de fachada activa

(b) Esquema de fachada activa multifuncional

Figura 3.20: Fachadas Multifuncionales. Fuente: Platzer [62]

Por su parte Chow, Li y Lin [64] introducen el concepto de ventana con cámara de agua circulante (Figura 3.21), como un acristalamiento activo a través de cuya cámara circula agua de modo controlado y a una velocidad reducida. También presentan sus posibles áreas de aplicación como el suministro de ACS, la reducción de las cargas de acondicionamiento y la mejora del confort visual, destacándolo como un elemento innovador orientado al acondicionamiento térmico. En este sentido, las principales aportaciones de este tipo de acristalamiento son dos: permite filtrar parte de la radiación solar infrarroja al mismo tiempo que se mantiene la transparencia para la parte visible del espectro, y permite transformar parte de la radiación solar incidente en energía renovable aprovechable. Es decir, funciona como un captador solar transparente y perfectamente integrado en el edificio (BIST), al mismo tiempo que contribuye

a reducir las cargas solares mediante un valor del factor solar (g) reducido. Respecto a los costes de instalación y mantenimiento de este tipo de acristalamientos, los autores sugieren que serían similares a los de otros sistemas solares térmicos.

Figura 3.21: Flujos de energía en una ventana con cámara de agua circulante. Fuente: Chow et al. [64]

Posteriormente, Li [82] estudia los aspectos térmicos y visuales de un acristalamiento con cámara de agua circulante basado en la circulación por termosifón o convección natural, que emplea únicamente un sistema de bombeo para almacenar el agua que sale del acristalamiento cuando no existe demanda instantánea de ACS (Figura 3.22). Para ello en sus ensayos experimentales parte de un entorno interior controlado por una unidad de refrigeración y un calefactor térmico que se encargan de mantener la temperatura interior constante.

Otros autores como Hatton et al. [83], han propuesto ventanas con cámara de agua circulante para el control térmico en las que el agua no fluye de manera libre por la cámara, sino que lo hace por conducciones con forma vascular (Figura 3.23).

En lo que se refiere al control de acristalamientos activos con agua en circulación, Carbonnier [84] gestiona una “envolvente fluida” (Figura 3.25) a partir de un controlador Campbell Scientific CR10X basado en sistemas embebidos. Esta envolvente consiste en una fachada

Figura 3.22: Montaje experimental de acristamiento con cámara de agua (izquierda) y su esquema correspondiente (derecha). Fuente: Li [82]

Figura 3.23: Ventana vascular vacía (izqda) y llena de agua (dcha). Fuente: Hatton et al. [83]

compuesta por un cámara a través de la que circula un fluido, que además está equipada con un conjunto de ventiladores que permiten renovar el aire del módulo en el que está instalada. Mediante el controlador la fachada puede adoptar diferentes configuraciones según se den condiciones ambientales de invierno o de verano. En el primer caso, el sistema de lamas móviles deja pasar la radiación solar y el agua circula desde la fachada activa al suelo radiante; en el segundo, las lamas limitan la radiación que penetra en el interior y se activan los ventiladores (Figura 3.25a). El autor comenta además la posibilidad de incluir otros elementos que podrían ser controlados por el sistema como un techo refrescante.

(a) Módulo con envoltente activa

(b) Componentes de la envoltente activa

Figura 3.24: Envoltente activa y sus componentes. Fuente: Carbonnier [84].

(a) Fachada fluidizada

(b) Datalogger Campbell Scientific CR10X

Figura 3.25: Fachada activa y su controlador. Fuente: Carbonnier [84].

(a) Funcionamiento en Invierno

(b) Funcionamiento en verano

Figura 3.26: Modos de funcionamiento de la fachada. Fuente: Carbonnier [84].

3.1.2.a. Contribución energética de los acristalamientos activos con cámara de agua circulante

La contribución energética de los acristalamientos activos con cámara de agua circulante puede darse tanto a partir de la reducción de las ganancias solares en condiciones de refrigeración, como mediante el aporte de energía a partir de agua previamente acumulada reduciendo así el consumo de calefacción.

Ahorros en refrigeración

Los ahorros en refrigeración se derivan de su capacidad de absorber parte de la radiación solar. Así, Li y Chow [42] obtienen una reducción en las ganancias solares del 40,57 % mediante acristalamientos activos con agua, frente al 31,53 % de un acristalamiento con vidrio reflectante. Estos resultados se obtienen con una configuración de 6/10/6, es decir, Vidrio claro 6 mm / Cámara agua 10 mm / Vidrio reflectante 6 mm, ensayado en una célula solar situada en Hong Kong, orientada hacia el sur, y funcionando como colector solar entre los meses de octubre a noviembre. En un experimento a tamaño real en una habitación de 3 m x 3 m x 3 m, y un acristalamiento activo de 2 m de alto x 0,8 m de ancho, con una configuración 12/30/24 (Vidrio claro 12 mm / Cámara de agua 30 mm / Vidrio doble bajo emisivo 24 mm), ensayado en Hong Kong con una orientación sur/suroeste, los rendimientos de captación oscilan entre el 5,9 y el 12,4 %, dependiendo del nivel de radiación solar, del caudal y de la temperatura ambiente.

Más tarde, Chow et al. [65] alcanzan ahorros de refrigeración del 52 % con respecto a un acristalamiento sencillo y del 32 % con respecto a un acristalamiento doble mediante simulación. Además, estudian su comportamiento térmico mediante un modelo matemático, analizando la influencia de diferentes variables como la temperatura interior, la temperatura exterior, la radiación solar, la velocidad del agua o los flujos de calor son analizados. Los resultados indican que este tipo de acristalamientos son apropiados para climas cálidos y moderados, pudiendo contribuir significativamente al pre-calentamiento de ACS.

Por su parte, Giménez-Molina [41] indica a partir de ensayos en células solares (Figura 3.27a) que en ciclo diurno de verano se pueden obtener unos ahorros de energía para refrigeración de aproximadamente un 76 % en fachadas con orientación oeste y hasta un 62 % en fachadas orientadas hacia el este, con respecto a un vidrio doble convencional (6/8/6). Por

otro lado, Pérez-Pujazón [85], también mediante ensayos en módulos de tamaño reducido, obtiene una reducción de la ganancia solar del 50 % en las orientaciones este y oeste. Por otro lado, a partir de simulaciones de células de tamaño habitable con envolvente adiabática, obtiene una reducción del 50 % en la demanda energética de refrigeración frente a un vidrio sencillo, y del 33 % frente a un vidrio doble. En las simulaciones de células de tamaño habitable basadas en construcción ligera, esta autora alcanza reducciones de las cargas de refrigeración del 40 % frente a un vidrio sencillo, y del 25 % frente a un vidrio doble equipado con una capa bajo emisiva.

Ahorros en calefacción

En lo referente a ahorros en calefacción, Giménez-Molina [41] afirma que en condiciones de invierno, al hacer circular agua a 20°C por la cámara se pueden reducir las pérdidas energéticas en un 47 % frente a la utilización de un vidrio doble (6/8/6). En estas condiciones para células adiabáticas de tamaño habitable orientadas al sur, Pérez-Pujazón [85] obtiene mediante simulaciones ahorros del 66 % frente a un vidrio sencillo, del 32 % frente a un doble acristalamiento con capa interior bajo emisiva, y del 50 % frente a un acristalamiento doble con capa de control solar en el exterior. En el caso de células de construcción ligera de tamaño habitable con la misma orientación, Pérez-Pujazón obtiene reducciones de las cargas de calefacción del 24 % frente a un vidrio sencillo, del 13 % frente a un vidrio doble con capa interior bajo emisiva y del 18 % frente a un vidrio doble con capa exterior de protección solar.

Rendimiento del vidrio actuando como colector solar

En cuanto al rendimiento del vidrio con agua como captador solar, Chow, Li y Lin [64] obtienen, mediante simulación numérica, un valor del 23,3 % para acristalamientos formados por dos vidrios claros y una cámara de agua de 0,01 m, cuando la velocidad de flujo es de 0,005 m/s. Este rendimiento llega al 38,2 % cuando se emplea un vidrio reflectante en la cara interna del acristalamiento, y al 45,4 % cuando se emplea un vidrio tintado en su cara externa. Estos valores se obtienen suponiendo régimen estacionario y una irradiación de 1000 W/m².

Posteriormente, Li y Chow [42] obtienen en 2011, mediante simulación, un rendimiento medio anual del 23,4 % haciendo circular agua a 0,0025 m/s a través de un acristalamiento activo con agua en circulación. Se trata de un acristalamiento compuesto por un vidrio claro

orientado hacia exterior una cámara de agua de 0,01 m, y un vidrio reflectante en la parte interior. Este acristalamiento tiene unas dimensiones de 1,25 m de alto y 0,8 m de ancho, y está orientado hacia el suroeste en una estancia cúbica de 27 m³ en Hong Kong, que tiene un clima húmedo subtropical influenciado por el monzón según la clasificación climática de Köppen [58].

Más adelante, Chow, Li y Clarke [86] obtienen mediante simulaciones en ESP-r, rendimientos de captación medios anuales comprendidos entre el 22 y el 35 %, para caudales de entre 3 y 24 litros/minuto. El acristalamiento simulado consta de un vidrio claro situado en la parte exterior y un vidrio reflectante en la parte interior.

A partir del desarrollo de un modelo numérico propio programado en FORTRAN, Chow, Li y Ling [87] estudian el comportamiento de un acristalamiento de 1,25 m de largo por 0,8 m de ancho. Los autores analizan la influencia del nivel de irradiancia, de la temperatura del agua que circula, de la velocidad del agua, y del ángulo de incidencia sobre la ganancia térmica del agua. El rendimiento que obtiene oscila entre un 17-52 % para invierno, y llega hasta un 92 % en verano.

Más tarde, Li en su tesis doctoral [82] obtiene rendimientos del acristalamiento activo como colector solar de entre el 5,2 y el 7,4 %, con un valor anual medio del 6,4 %. Para ello, emplea una configuración 6/10/6, compuesta por un vidrio claro de 6 mm, una cámara de agua de 10 mm y un vidrio reflectante 6 mm, situado en Hong Kong. Esta autora señala que el rendimiento será mayor cuando menores sean las diferencias entre las temperaturas del agua de la cámara tanto con el exterior como con el interior, y cuando mayor sea el rendimiento del intercambiador de calor mediante el que se extraiga la energía del agua captada. Finalmente, Pérez-Pujazón obtiene rendimientos en torno al 65-70 % con respecto a captadores solares de placas planas cuando la temperatura de circulación del agua está próxima a la ambiental, sin embargo estos valores incluyen la energía transferida desde el interior de los módulos al fluido en circulación por lo que no deberían considerarse directamente como rendimientos de captación netos.

Finalmente, Gil-López y Giménez-Molina [44] afirman obtener un ahorro del 18,26 % en el consumo combinado de calefacción y refrigeración para una habitación de 3 m x 3 m x 2,5 m situada en Madrid, a partir de simulaciones.

A pesar de que estos autores [87, 88] indican que el flujo de agua debe ser controlado, y

(a) Célula de ensayo a escala

(b) Ensayo a escala real

Figura 3.27: Montajes experimentales de ventanas con cámara de agua circulante. Fuente: Giménez-Molina [41] (a) y Chow y Li [88] (b).

resaltan la importancia de la velocidad de circulación del agua y el diferente comportamiento del sistema en función de la radiación solar, emplean sistemas en funcionamiento continuo, sin ningún sistema de control que gestione el funcionamiento del acristalamiento (Figura 3.28).

Figura 3.28: Sistema de acristalamiento activo asociado a instalación de ACS. Fuente: Chow et al. [87]

No obstante, Giménez-Molina [41] en su tesis doctoral realiza diversos ensayos experimentales empleando un termostato asociado a un relé que introduce agua caliente en la cámara de agua bajo ciertas condiciones (Figura 3.27a). A partir de ellos pone de manifiesto la importancia que tendría un sistema de control automático que gestionara el funcionamiento de este tipo de acristalamientos con cámara de agua circulante. Además, hace hincapié en la mejora técnica que supondría el control inteligente del fluido circulante en la cámara y aporta unos

primeros resultados sobre sus prestaciones en condiciones de servicio mediante la utilización de un termostato. Finalmente, plantea que se podría optimizar considerablemente la eficiencia energética de este acristalamiento con la implementación y el control de una instalación de apoyo de cierta complejidad pero con un coste reducido.

La necesidad de un sistema de control para los acristalamientos activos con cámara de agua circulantes queda de nuevo reflejada por Gil-López y Giménez-Molina [43, 44]. En este caso se apunta al hecho de tener que controlar la temperatura del circuito secundario (Figura 3.29), así como la cantidad de fluido suministrado mediante un calentador auxiliar (Figura 3.30), a partir de un sistema de control centralizado que activa las correspondientes bombas y válvulas.

Figura 3.29: Esquema de una instalación de acristamientos activos con cámara de agua circulante. Fuente: Gil-López et al. [43]

Figura 3.30: Esquema de una instalación de acristamientos activos con cámara de agua circulante con apoyo auxiliar eléctrico. Fuente: Gil-López et al. [44]

Por otro lado, Pérez-Pujazón [85] plantea una serie de escenarios de rehabilitación de un taller docente situado en la ETS de Arquitectura de Madrid (Figura 3.31), con objeto de transformarlo en un EECN mediante el empleo de acristalamientos activos basados en una cámara de agua circulante. De entre los escenarios presentados, los denominados 2 y 3 emplean acristalamientos activos que operan de manera independiente al sistema de climatización basado en bombas de calor aire-aire. Sin embargo, en el escenario de mayor eficiencia y mayor rentabilidad, denominado Escenario 4, los acristalamientos activos están asociados a una bomba de calor agua-agua asistida por un sistema de geotermia.

En definitiva, lo que se pretende es el uso de los acristalamientos activos combinados con una bomba de calor geotérmica como un elemento que puede contribuir a reducir la potencia de la instalación fotovoltaica necesaria para convertir un taller de uso docente en un EECN, lo que de manera inequívoca conlleva al empleo de un sistema de control capaz de gestionar la instalación.

Figura 3.31: Taller situado en la ETS Arquitectura de Madrid. Fuente: Archivo propio

Ante esta necesidad, admitida pero no resuelta por los diferentes autores anteriores, este trabajo propone la incorporación de un sistema de control domótico que automatice el funcionamiento de los acristalamientos con cámara de agua circulante, a partir del planteamiento teórico inicial sugerido por Millán-Anglés y Lauret [45].

3.1.2.b. Proyectos de investigación sobre fachadas con fluidos en circulación

Considerando el actual contexto europeo de eficiencia energética de los edificios, en el que éstos consumen el 40 % de la energía total en la Unión Europea [7], junto con la proximidad del año 2020, en el que se cumple el plazo para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones contaminantes con respecto a 1990, se entiende el interés por parte las autoridades europeas por impulsar sistemas de fachadas energéticamente eficientes.

En el caso concreto de las fachadas con fluidos en circulación, este interés se ha materializado en la aprobación de diferentes proyectos de investigación en los últimos años. Prueba de ello es el proyecto Europeo *Cost Effective - Converting facades into multifunctional, energy gaining components* [89] orientado a la obtención de fachadas que sean capaces de aportar energía a los edificios. Uno de los conceptos desarrollados en este proyecto es emplear las fachadas como colectores solares transparentes [90].

En esta misma línea, el proyecto de investigación alemán *Multikomp-I - Development of multifunctional solar buildings components* [91] pretende aunar en un único componente tres características fundamentales de los edificios: generación de energía térmica, aislamiento térmico y protección frente a los fenómenos ambientales. Para ello se proponen diferentes conceptos de cerramientos multifuncionales que emplean tanto captadores térmicos transparentes como materiales aislantes. Según cada diseño concreto de cerramiento, la energía captada es almacenada en forma de agua caliente o en materiales de cambio de fase (PCM), y puede ser empleada para generar ACS o para el acondicionamiento térmico de espacios.

De manera más específica, el proyecto Europeo *FluidGlass - Solar thermal glass facades with adjustable transparency* [92], está orientado hacia la obtención de un nuevo tipo de fachadas solares térmicas que incrementen su flexibilidad de uso y su eficiencia energética, tanto en los edificios como a escala de distrito. Para ello propone el uso de fachadas multicapa que combinan el uso de dos acristalamientos con agua en circulación con el de dos cámaras llenas de gases aislantes (Figura 3.32a). Este proyecto estudia, además, el control de la radiación solar en los acristalamientos mediante el empleo de fluidos con un nivel de transparencia variable (Figura 3.32b). A partir de este estudio se destacan las posibilidades de gestión avanzada de la energía que proporcionan este tipo de fachadas, así como el aprovechamiento de las energías renovables y su uso combinado con los sistemas de acondicionamiento térmico, aspectos en los que los sistemas de control y gestión de las instalaciones resultan de gran importancia.

(a) Cámaras de fluido

(b) Acristamientos con transparencia variable

Figura 3.32: Fachadas propuestas en FluidGlass. Fuente: Stopper [93] y Gstoechl [94]

Por otro lado, el proyecto Europeo LAWIN - *Large Area Fluidic Windows* propone el empleo de vidrio con microcanales a través de los que circula el fluido. Mediante el control de la circulación de este fluido se ajustan tanto las transferencias térmicas como lumínicas a través del vidrio [95].

Debe mencionarse que en 2015 fue aprobado el proyecto InDeWag - *Industrial Development of Water-Flow Glazing Systems*, dentro del Programa Europeo de I+D Horizonte 2020. El autor del presente trabajo, participó en el desarrollo de la propuesta como miembro del equipo de la ETS de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. Es conveniente indicar, que tanto el sistema de gestión y control de los acristamientos, que permitiría su integración con las instalaciones de acondicionamiento, como la simulación de estos acristamientos activos, constituyen aspectos clave en este proyecto.

En lo que se refiere al control de acristamientos activos, el proyecto SINGER [96], desarrollado dentro de la convocatoria Innacto 2011 realizada por el Ministerio de Economía y Competitividad español, tiene como objetivo el diseño y desarrollo de un sistema inteligente para la gestión de la energía mediante la rehabilitación de la envolvente del edificio empleando sistemas de acristamientos activos.

3.1.3. Control de sistemas solares destinados al acondicionamiento

Una vez planteado el uso de los acristamientos activos como elementos de climatización, tanto de forma autónoma como integrados con sistemas basados en bombas de calor, cabe preguntarse qué características tendría que poseer un sistema de control que fuera capaz de

gestionar este tipo de instalaciones.

Dado que estos acristalamientos funcionan en parte como sistemas de acondicionamiento del interior de edificio, se ha considerado de interés llevar a cabo una revisión de los controladores que se han venido empleando hasta la fecha en este tipo de sistemas, con objeto de establecer los requisitos mínimos del sistema de control requerido.

Los sistemas orientados al acondicionamiento térmico de edificios aparecieron a mediados de la década de 1930, ganando importancia a mediados de la década de 1940. En esa época los sistemas de calefacción domésticos empleaban hornos de carbón como combustible, y lo que se pretendía era aprovechar los radiadores existentes empleando agua calentada mediante energía solar. Para transferir la energía solar captada en energía útil se diseñaron los primeros colectores solares térmicos, que pueden definirse como un tipo especial de intercambiadores de calor que transforman la energía contenida en la radiación solar en energía interna del medio que la transporta [97].

Desde el comienzo de los proyectos de investigación sobre sistemas solares empleados en las primeras casas solares experimentales en el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) (Figura 3.33) y en la Universidad del Estado de Colorado (CSU) [98], los sistemas solares activos, tanto destinados a la obtención de Agua Caliente Sanitaria (ACS) como orientados al acondicionamiento térmico, han requerido algún tipo de control para funcionar de manera apropiada. Esto se debe a que están basados en la acumulación de energía para ser usada, por lo general, con un cierto desfase temporal. Así, la energía es almacenada mediante tanques de agua, lechos de grava o, de manera menos común, en materiales de cambio de fase o *Phase Change Materials* (PCM).

En estos sistemas la energía es captada mediante la circulación de un fluido a través de un colector solar térmico, el rendimiento de este colector depende esencialmente de la temperatura del fluido que circula a través de él y de la temperatura a la que se encuentra el fluido almacenado. Por tanto, la puesta en marcha y el funcionamiento de los sistemas activos solamente tiene sentido bajo ciertas condiciones atmosféricas y ciertos valores de temperaturas de almacenamiento del fluido. Es decir, el funcionamiento del sistema debe estar supervisado, de tal manera que el aprovechamiento de la energía solar permita almacenar una cantidad de energía superior a la consumida por el sistema de bombeo y otros sistemas auxiliares.

(a) MIT Solar House I

(b) MIT Solar House III

(c) MIT Solar House IV

(d) MIT Solar House VI

Figura 3.33: Prototipos de casas solares desarrolladas por el MIT. Fuente: MIT [54]

La principal aplicación de los sistemas solares desde el desarrollo de los primeros prototipos fue el acondicionamiento de los edificios y, más concretamente, los sistemas de calefacción, que, por lo general, estaban basados en el clásico control On/Off implementado mediante un termostato que mide la diferencia entre la temperatura de la estancia calefactada y la temperatura de consigna establecida.

Un ejemplo de este tipo de controladores lo constituye la primera casa solar experimental desarrollada en 1938 por Hoyt C. Hottel, ingeniero químico y profesor del Departamento de Ingeniería Química en el MIT. Esta casa prototipo, denominada *Building 34* o MIT Solar House I (Figura 3.33a), basa su control en una válvula de dos vías conectada a un termostato diferencial (Figura 3.34) que acciona la circulación del aire a través de la parte superior del tanque que contiene el agua almacenada como agente calefactor. Mediante este sistema es posible mantener una temperatura interior de unos 22°C ($\simeq 72^{\circ}\text{F}$) durante el invierno [99].

Aunque los sistemas de control de estas casas solares están basados fundamentalmente en termostatos diferenciales, ya desde las primeras investigaciones queda patente que el rendimiento de los sistemas solares puede mejorarse empleando otras estrategias de control más complejas. Así, Whillier [100] indica que en el caso de sistemas solares orientados a la calefac-

Figura 3.34: Esquema operación de la MIT Solar House I. Fuente: Whillier [100]

ción, el uso de un sistema de control que regulara el punto de entrada del agua mejoraría el rendimiento del sistema. No obstante, este autor también señala que, para un sistema agua-agua, el porcentaje de mejora obtenida no podría justificar el coste del sistema de control en esos momentos, siendo algo más conveniente para un sistema agua-aire.

Otras casas solares como la *MIT Solar House II* también estaban dotadas de un sistema de control automático. En este caso, cuando la diferencia entre la temperatura del agua del colector y el agua almacenada en el tanque era mayor de 5°F ($\approx 9^{\circ}\text{C}$) ésta era bombeada de forma automática a través del colector para aumentar su temperatura. Posteriormente, cuando la temperatura en el interior de la casa bajaba de 72°F ($\approx 22^{\circ}\text{C}$), el sistema de control hacía circular de manera automática el agua caliente almacenada a través de un sistema de techo radiante en la sala de estar. Además, estaba equipada con un sistema de calefacción eléctrico auxiliar instalado en el tanque de almacenamiento de agua. De esta forma, en caso de que la temperatura interior bajara de 70°F ($\approx 21^{\circ}\text{C}$), el sistema de control se encargaba de activar el sistema de calefacción auxiliar. A partir de los datos obtenidos, el sistema solar era capaz de proporcionar entre el 80 % y el 90 % de las necesidades de calefacción de la casa, aportando el resto el sistema auxiliar.

(a) Controladores en sistema de acondicionamiento solar basado en líquido

(b) Controladores en sistema de acondicionamiento solar basado en aire

Figura 3.35: Controladores en sistemas de acondicionamiento solar. Fuente: Duffie y Beckmann [98]

Considerando las casas solares enumeradas, es conveniente señalar que, a excepción de la MIT Solar House V, todas las casas solares del MIT han incluido sistemas activos que hacían uso de algún sistema de control. Este hecho no debería causar sorpresa, ya que el rendimiento de los sistemas solares activos depende en gran medida de diferentes variables, como la radiación solar incidente, los requerimientos de calefacción, refrigeración o ACS, la temperatura de funcionamiento del sistema, la temperatura de acumulación, etc., lo que hace que los sistemas de control jueguen un papel determinante en su rendimiento.

3.1.3.a. Control óptimo

Durante las décadas de 1970 y 1980 diversos autores analizaron las posibles mejoras en las prestaciones de las instalaciones de energía solar térmica a través de diferentes sistemas y estrategias de control. Dentro de los diferentes tipos de control, un considerable número de autores estudian el control óptimo de los sistemas solares. Entre ellos puede destacarse a Kovarik y Lesse [101], que estudian el problema del control óptimo del caudal en captadores de baja temperatura aplicando el principio de Máximo de Pontryagin [102], demostrando que mediante el control del caudal a través del colector puede obtenerse una mejora en su rendimiento. Sin embargo, este enfoque no puede aplicarse en la práctica al presentar ciertas limitaciones técnicas: por un lado, la función de control obtenida está en función del tiempo y no en función de una variable medible, como la temperatura ambiente o la radiación; y por otro, se requiere el conocimiento previo de variables como la temperatura ambiente y la radiación solar.

Por su parte, Dorato [103] lleva a cabo una revisión sobre la aplicación de la teoría moderna de control a los sistemas de energía solar térmica, poniendo de manifiesto su relevancia en el diseño de este tipo de sistemas. Además, hace un repaso a las distintas técnicas de optimización disponibles para sistemas basados en energía solar [104], planteando que si el control óptimo se orientara hacia la minimización del consumo de energía auxiliar, este tipo de control podría representar una de las maneras más significativas de mejorar la conservación de la energía. Adicionalmente, afirma, con sorprendente capacidad de anticipación que, ante la disminución del precio de los ordenadores, este tipo de control estaba destinado a jugar un papel especialmente relevante en este tipo de sistemas.

En relación con los controladores óptimos, Winn y Ellsworth [105] proponen clasificarlos en tres grupos, atendiendo a la forma en la que la energía es captada y distribuida:

- Controladores óptimos de primera clase: son aquellos que aportan calor a un edificio de manera óptima tal forma que se minimice tanto la energía empleada como la falta de confort de los ocupantes.
- Controladores óptimos de segunda clase: son aquellos que maximizan la diferencia entre la energía captada y los costes de bombeo asociados al proceso de captación.
- Controladores óptimos de tercera clase: son aquellos que combinan la funciones de captación y distribución.

Autores como Winn y Orbach [105, 106] enfocan su investigación sobre los controladores óptimos de segunda clase, obteniendo una estrategia mucho más sencilla de implementar en un control por realimentación a partir de los valores de temperatura de almacenamiento, temperatura ambiente y radiación solar o la temperatura de salida del colector. A partir de las simulaciones desarrolladas para un colector de 8 m², estos autores afirman que el controlador propuesto es capaz de captar hasta un 74 % más de energía útil. Además, ponen de manifiesto que cuanto menor es el nivel de radiación solar, mayor es la importancia que cobra el control óptimo frente al On/Off (Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Relación entre radiación solar y mejora mediante control óptimo. Fuente: Winn y Ellsworth [105]

Radiación solar (kJ/m ²)	Incremento de energía útil
14292	5 %
14190	4 %
9751	22 %
6482	74 %

Con el objetivo de maximizar la energía captada mediante el control de la velocidad de fluido a través del colector, Orbach, Rorres y Fischl [106] estudian el control óptimo de un sistema solar compuesto por un colector, descrito por un modelo bilineal de parámetros distribuidos, y por un depósito de almacenamiento, basado en modelo bilineal de parámetros concentrados. Para ello proponen un control *Bang-Bang* en lazo cerrado (Figura 3.36).

Figura 3.36: Implementación del control por realimentación en un sistema solar. Fuente: Orbach et al. [106]

En cambio, otros autores como Fritchman y Grantham [107, 108], se centran en tratar el problema de maximizar la temperatura a la que se almacena el fluido en el tanque, mediante el control de los caudales de los lazos primario y secundario, cuando se emplea un intercambiador de calor de flujo a contracorriente. Estos autores concluyen que, en muchos casos, los caudales

óptimos pueden obtenerse mediante un control On/Off, lo que sin duda es una de las causas de que un gran número de los sistemas solares térmicos sigan hoy empleando este tipo de control.

Por otro lado, autores como Kotob, Salman, Ayyash y Farhat [109] proponen un sistema de control óptimo basado en un microprocesador para un sistema de enfriamiento solar, indicando que las simulaciones muestran una reducción del más del 30 % de energía auxiliar. A partir de estos datos, los autores señalan el potencial que supone poder implementar los algoritmos de control en microcontroladores de bajo coste, y consideran que esto constituye el primer paso para implementar otras técnicas de control en ellos orientadas a mejorar los sistemas de acondicionamiento en general y los basados en energía solar en particular.

Además, Kummert, André y Nicolas [110] analizan la aplicación de un control óptimo al sistema de calefacción auxiliar de un edificio comercial pasivo cuando se compara tanto con un controlador PID convencional, como con un controlador basado en válvulas termostáticas. Mediante el uso del controlador propuesto se alcanzan ahorros en calefacción al mismo tiempo que se mejora el confort de los usuarios.

Por su parte Badescu [111], señala las ventajas de emplear un control óptimo basado en hacer funcionar la bomba a dos velocidades de impulsión en lugar de emplear una estrategia On/Off clásica de una sola velocidad, o una estrategia de caudal constante. Entre ellas destacan el incremento de la conversión solar así como de la energía acumulada en los depósitos. En línea con lo indicado anteriormente [105, 112], este autor también señala que el control óptimo es especialmente efectivo en días despejados o con poca nubosidad.

En esta línea, Nhut y Park [113] proponen el uso de un controlador basado en control óptimo que haga uso de un flujo variable para un sistema solar doméstico (Figura 3.37). Mediante simulaciones en condiciones climáticas reales estos autores apuntan que, aunque las ganancias solares aumentan solo en un 1,54 %, el consumo de la bomba se ve reducido en un 65,61 %.

Finalmente, merece la pena destacar el completo estudio sobre estrategias de control para sistemas solares llevado a cabo por Winn [114].

Figura 3.37: Esquema de control del sistema solar doméstico. Fuente: Nhut [113]

3.1.3.b. Control mediante microprocesadores

La necesidad de considerar estrategias de control más complejas que el tradicional On/Off, incluyendo la posibilidad del control óptimo del sistema solar en el controlador, lleva a diversos autores a proponer el control mediante microordenadores ² basados en microprocesadores. La principal ventaja de este tipo de controladores es que permite implementar una gran variedad de estrategias de manera sencilla, lo que les otorga un papel esencial en el control de este tipo de sistemas.

Un ejemplo de ello es el sistema de control basado en un microprocesador destinado a controlar el sistema de calefacción de la casa SOLAR I de la Colorado State University (CSU) propuesto por Johnson [115]. En esta casa, al igual que en la *SOLAR House I* del MIT (Figura 3.33), el calor es transferido desde el depósito de acumulación de agua, o desde el sistema auxiliar en su caso, hasta la casa empleando aire forzado que atraviesa los serpentines por los que circula el agua. Mediante el control basado en el microprocesador MOS 6502 (Figura 3.38), se busca alcanzar un control más eficiente, es decir, un mejor aprovechamiento de la energía solar, de tal forma que se reduzca el uso de la fuente auxiliar de energía, por debajo del que ofrecen los sistemas On/Off, también conocidos como *Bang-Bang*. Además, este tipo de controladores permiten que el sistema responda no solo a la temperatura interior, sino también a condiciones atmosféricas concretas, situaciones de falta de confort o costes asociados a la instalación solar o a la energía auxiliar empleada, y su estrategia de control se basa en minimizar

²Aunque el término microordenador está actualmente en desuso, durante las décadas de 1970 y 1980 era utilizado para designar un ordenador de pequeña potencia cuya Unidad Central de Proceso (*Central Process Unit* o CPU) estaba basada en un microprocesador que incluía además la memoria y los sistemas de entrada y salida (I/O).

un funcional asociado al coste de la energía auxiliar empleada. En este caso, los resultados de la simulación indican que el sistema basado en el microprocesador permite un ahorro de hasta un 26 % de energía auxiliar con una desviación de 1,36°C con respecto a la temperatura de consigna. Por otro lado, este sistema ofrece una serie de ventajas: mayor estabilidad en la temperatura del recinto calefactado, mejora del confort, aumento de duración de los ciclos de funcionamiento en cada modo, reducción del desgaste de los componentes, y aumento del grado de flexibilidad, permitiendo la programación de otras funciones, como por ejemplo, de minimización de costes.

Los ahorros comentados se obtienen tras comparar los resultados usando un Algoritmo de Control Discreto, con los obtenidos mediante un Controlador Tradicional Modificado o *Modified Bang Bang* (MBB) -empleado en la casa MIT SOLAR I-, a través de un programa de simulación dinámico. Dado que cada uno de los algoritmos empleados tienen objetivos diferentes, el MBB está orientado a mantener la temperatura interior dentro de un rango, y el Algoritmo de Control discreto persigue minimizar el coste de la energía auxiliar, con idea poder comparar su eficacia, lo que se plantea es determinar la energía auxiliar que necesita cada uno de ellos para mantener una misma temperatura interior.

Figura 3.38: Sistema de control digital propuesto. Fuente: Johnson [115]

Continuando en esta línea, Moen [117] propone el uso de un sistema de gestión de energía solar basado en un microprocesador programable. La principal ventaja que ofrece este sistema es que, al ser programable, puede adaptarse a las características concretas de los diferentes sistemas solares existentes (sistemas basados en agua o en aire, calefacción directa, almacenamiento, etc.) de manera flexible, lo que permite emplear el mismo dispositivo para diferentes tipos de sistemas, obteniendo por tanto un bajo coste de fabricación. El sistema propuesto por este autor es tremendamente innovador para la época, siendo capaz de gestionar diferentes modos de operación (Figura 3.39a) que son, además, seleccionados por el usuario a través de

Microprocesador MOS 6502	
Nº bits	8
Generador reloj	Integrado
Velocidad reloj	2 Mhz
Bus direcciones	16 bits
Tensión trabajo	5 V
Precio (1976)	25\$

Tabla 3.2: Características del microprocesador empleado por Johnson. Fuente: MOS Technology [116]

un panel de control denominado *System Inicializacion Panel* (SIP) (Figura 3.39b).

MODE	RELAY							MODE PRIORITY
	P ₁	P ₂	P ₃	V ₁	V ₂	V _{GAS}	F	
PURGE	E	-	-	E	-	-	-	1
HEAT COLLECTOR	E	E	D	D	D	-	E	4
HEAT STORAGE	-	D	E	-	D	-	E	3
CHARGE STORAGE	E	E	D	D	E	-	-	5
AUXILIARY HEAT I	-	-	-	-	-	E	E	2
DEFAULT	D	D	D	D	D	D	D	

(a) Modos de operación del sistema

(b) Panel de control del sistema (SIP)

Figura 3.39: Sistema de gestión de energía solar. Fuente: Moen [117]

Más adelante, Tyuluman, Schroder y Austin [118] describen un sistema orientado a monitorizar y controlar un panel solar térmico, correspondiente a las instalaciones de investigación de la Universidad de Texas. Su principal novedad es que el programa principal de control está escrito en el lenguaje de programación BASIC. Esto permite llevar a cabo cambios en la programación con muy poco esfuerzo, frente a la implementación de los controladores directamente en *hardware* o la dificultad de programar algunos microprocesadores con lenguajes de bajo nivel. También resulta relevante que, a pesar de emplear este tipo de lenguaje de programación, la rapidez de ejecución del código programado permite tomar lecturas de datos cada tres segundos.

Por su parte, Murray, Jones y Smith [119] proponen un sistema de control mediante un microordenador del Laboratorio de Energía Solar de Louisville (ULSERP). En este caso, el sistema tiene por objetivo mantener controlado el acondicionamiento de todo el edificio empleando la menor cantidad posible de energía convencional. Para ello, en primer lugar el sistema determina si el proceso de captación debe ponerse en marcha y, a continuación, si

debe activarse el modo de calefacción o refrigeración. Estas decisiones se toman a partir de una serie de algoritmos implementados en varios submodos de operación (Figura 3.40). Los autores concluyen que el uso de un sistema basado en un microordenador es especialmente apropiado para controlar un sistema de energía solar y señalan, además, que este tipo de sistemas ofrecen un gran potencial en su investigación, lo que hace que sea especialmente relevante en el planteamiento del presente trabajo de investigación.

Figura 3.40: Organigrama del submódulo de organización. Fuente: Murray et al. [119]

En relación con este tipo de controladores, Paton, Hughes y Youle [120] analizan el papel del control mediante microordenadores en aplicaciones solares, clasificándolos en tres tipos:

- Ordenadores encapsulados en un único chip o *single chip computers* ([121]), que podrían ser una solución ideal para sistemas que deban tener una inteligencia limitada, como *dataloggers*.
- Ordenadores basados en una única placa o *single board computers*, que incluyen el microprocesador, la memoria, las entradas y salidas así como los circuitos asociados al reloj en una sola placa impresa. Estas placas disponen de diferentes conexiones de entrada/salida (E/S) y contendrían rutinas pre-programadas para gestionar la entrada y salida de datos. Además, algunas de ellas ofrecerían la posibilidad de ser programadas mediante lenguajes de alto nivel como BASIC o PASCAL, facilitando esta tarea. Este tipo de ordenadores podrían llevar a cabo el control de una instalación sencilla que

tomara datos de algunos sensores, proporcionara información de forma gráfica de los parámetros de funcionamiento del sistema y realizara acciones de control con un cierto grado de inteligencia. Un ejemplo ilustrativo de lo expuesto lo constituye el control de la *estufa hidrónica* propuesto por Paton et al. [120].

- Ordenadores basados en varias placas o *multi-board computers* donde cada placa tendría una tarea definida (placa de la CPU, placa de memoria, placa de dispositivos de E/S, etc.), que serían capaces de gestionar un número elevado de sensores, gestionar un número considerable de entradas y salidas, así como poseer una apreciable capacidad de cálculo. Este tipo de sistemas serían capaces de controlar sistemas complejos como un seguidor solar o un prototipo de casa solar completa.

Estos autores predicen además, de manera bastante acertada, el gran desarrollo que ha experimentado la electrónica y la espectacular disminución del precio de sus componentes que, entre 1976 y 1981, se redujo en un factor de casi 500.

Más tarde, Waddington [122] estudia los requerimientos que debería tener un sistema de control orientado al acondicionamiento de una vivienda independientemente de la fuente de energía que se empleara para ello. El sistema propuesto hace uso de dos lazos de control, el primero está relacionado con el control del agua que se emplea como medio calefactor, mientras que el segundo controla el uso de este agua en función de la demanda de los ocupantes de la vivienda. Este autor va un paso más allá del desarrollo de un controlador basado en un microcontrolador, ya que además describe un sistema de gestión de energía solar completo para uso doméstico.

Tras evaluar los requisitos que debería tener el sistema de gestión, plantean dos alternativas para su realización. Una de ellas está fundamentalmente en *hardware* mientras que la otra, más flexible, emplea el mínimo *hardware* necesario llevando a cabo las acciones de monitorización y control mediante un microordenador (Figura 3.41). No obstante, concluye que, aunque el sistema basado en el microordenador sería ligeramente más rápido de fabricar, su coste sería casi un 50 % superior al sistema implementado enteramente en *hardware*.

El empleo del microprocesador permite controlar sistemas con una cierta complejidad o en los que se quieren emplear estrategias avanzadas de control, que van más allá de las funciones que ofrecen los controladores On/Off tradicionales. En este sentido, Santamouris y Lefas [123] analizan los problemas de control asociados a los sistemas solares híbridos originados por la necesidad de combinar estrategias activas y pasivas al mismo tiempo. Un ejemplo típico se da

Figura 3.41: Esquema de microordenador propuesto. Fuente: Waddington [122]

cuando es necesario determinar si debe emplearse la energía almacenada por el sistema activo o pasivo, o comparar la temperatura en los colectores con la temperatura de almacenamiento para evitar almacenar agua a menor temperatura que la ya almacenada. Dada la complejidad de este tipo de sistemas, el control no puede llevarse a cabo por controladores de tipo On/Off, sino que debe implementarse en un microprocesador. Para ello proponen el uso de sistemas de control basados en microordenadores de 8 bits encapsulados en un solo chip (Figura 3.42), ya que cuentan con la suficiente potencia para gestionar las tareas de control con un coste muy reducido en relación al resto de la instalación de acondicionamiento híbrida.

Figura 3.42: Esquema del sistema de control para un sistema híbrido. Fuente: Santamouris y Lefas [123]

Más adelante, Lefas [124] propone un sistema basado en un microprocesador para controlar un sistema solar activo distribuido de calefacción (Figura 3.43). En este tipo de sistemas existe un circuito primario y varios circuitos secundarios dotados cada uno con un tanque de

almacenamiento, de manera que es posible almacenar agua a diferentes temperaturas. Este tipo de configuración hace necesario un controlador dotado de una cierta inteligencia, más allá de la ofrecida por un termostato, de tal forma que se puedan implementar los algoritmos de control correspondientes. Este autor también señala que, dada la lenta respuesta de los sistemas de almacenamiento solar, es suficiente emplear microcontroladores de 8 bits encapsulados en un único chip, lo que permite que el coste del sistema de control sea una fracción muy pequeña del coste total del sistema solar.

Figura 3.43: Diagrama de bloques del controlador para un sistema solar activo distribuido.
Fuente: Lefas [124]

Haghighat [125], por su parte, estudia mediante simulación las ventajas de emplear un controlador en la gestión de un sistema de captación que opera en un modo de Control de Temperatura Fija o *Fixed temperature control* (FTC) (Figura 3.44). De esta manera, el sistema entra en funcionamiento esencialmente en las horas centrales del día, cuando la energía captada es superior a la invertida en la circulación del agua, contribuyendo así tanto al ahorro de energía como a los costes de mantenimiento.

Muralidhar, Nagaraju y Mohan [112, 126] proponen un sistema de control que emplea un controlador SC301 de Pyramid Controls Ltd., que integra la función de control diferencial de temperatura, y un sistema de monitorización basado en un microprocesador 8085 (Figura 3.45). Los autores apuntan que, en días soleados con pocos cambios en el grado de insolación, los ahorros obtenidos se sitúan en torno al 9 %. Sin embargo, en días con nubosidad variable, el sistema de control permite un funcionamiento más eficiente que la alternativa sin control, obteniéndose ahorros que oscilan entre el 20 y el 54 %, siendo mayores cuanto menor es el grado de insolación, en consonancia con lo indicado por Winn y Ellsworth [105].

Ya en 1995, Dounis, Lefas y Argiriou [127] presentan diferentes técnicas de control para edificios dotados de sistemas solares de calefacción. Esencialmente comparan y analizan las

ventajas de las técnicas basadas en el conocimiento como la lógica borrosa o *fuzzy logic*, frente a las aproximaciones más clásicas de control como las basadas en controles On/Off y PID.

Conforme se incrementa la potencia y la disponibilidad de los controladores, se estudian estrategias de control con un nivel de complejidad creciente. Así, Prud'Homme y Gillet [128] logran ahorros del 10 % en el consumo eléctrico del calentador auxiliar, así como una mejora en las condiciones de confort de un sistema solar doméstico, mediante el empleo de estrategias avanzadas de control predictivo, la división del calefactor en tres elementos y la segmentación del depósito. En este caso, el sistema de control selecciona la válvula de entrada al depósito

más apropiada según su temperatura, al mismo tiempo que activa el número de elementos calefactores más apropiado en cada momento (Figura 3.46).

Figura 3.46: Esquema del montaje experimental equipado con control predictivo y depósito segmentado. Fuente: Proud'homme et al. [128]

Para sistemas solares de mayor complejidad Peter y Drück [129] sostienen que se hace imprescindible utilizar controladores e instrumentación de alta calidad y ponen de manifiesto la importancia de seleccionar apropiadamente la diferencia de temperaturas a la que se acciona el sistema de bombeo.

Por otra parte, se han encontrado en la literatura consultada varias referencias acerca de necesidad de controlar de manera eficiente los sistemas activos. Así, Nguyen y Aiello [130] indican la necesidad de un control dinámico sobre el edificio para lograr una elevada eficiencia energética en ellos, que pueden llegar a alcanzar ahorros del 40 % en el consumo de los sistemas de acondicionamiento.

Por otro lado, Kicsiny y Farkas [131] han estudiado controles diferenciales mejorados para sistemas de calefacción solar. Mientras que Buzás y Kicsiny [132] presentan funciones de transferencia de colectores solares orientadas al control y el análisis dinámico de los colectores. Posteriormente Kicsiny desarrolla funciones de transferencia que permitirían controlar los sistemas solares completos [133].

Además de las funciones de control habituales relacionadas con el control del caudal o la temperatura, los sistemas de control pueden ofrecer algunas más avanzadas orientadas a su protección. Un ejemplo es la propuesta de Liu [134] de emplear el controlador para evitar la congelación de los elementos más sensibles del sistema (Figura 3.47a). Para ello se dota al circuito de un *by-pass* (en color rojo en la Figura 3.47b) mediante el que se evita hacer pasar el fluido por el intercambiador de calor cuando este se encuentra a una temperatura inferior a 0°C .

(a) Controladores en un sistema de calefacción solar

(b) Controlador del sistema activo de protección contra heladas

Figura 3.47: Aplicaciones de controladores en un sistema de calefacción solar. Fuente: Liu [74]

Otro ejemplo acerca de funciones avanzadas que puede ofrecer un sistema de control basado en un microprocesador es la propuesta por Huang et al. [135]. Estos autores han desarrollado un sistema de control con Seguidor del Punto de Máxima Potencia o *Maximum-Powerpoint Tracking Control* (MPPT) (Figura 3.48), destinado a gestionar un sistema de calefacción que es capaz de optimizar la captación de energía minimizando el consumo del sistema de impulsión. Un sistema de seguidores solares similares, en el que éstos se emplean para dotar al edificio de la máxima cantidad de luz natural posible, es el utilizado en la sede del HSBC en Hong Kong proyectado por Norman Foster (Figura 3.49).

Figura 3.48: Diagrama de bloques del sistema de control con seguidor del MPPT. Fuente: Huang [135]

En el desarrollo de la metodología experimental de este trabajo de investigación ha resultado fundamental la propuesta algunos de los autores anteriores como Waddington o Lefas, especialmente en el hecho de utilizar microcontroladores de bajo coste e implementar en ellos los algoritmos de control con idea de emplear estrategias de control avanzadas en la gestión de los sistemas solares.

Figura 3.49: Interior de la sede del HSBC en Hong Kong. Fuente: Foster and Partners [15]

3.1.4. Control de sistemas de acondicionamiento

Desde el comienzo de su desarrollo en la década de 1940, el control en los sistemas de acondicionamiento se llevó a cabo mediante termostatos basados en estrategias On/Off con una cierta histéresis [136]. Este tipo de control en ocasiones daba lugar a temperaturas excesivas, lo que llevó al empleo de controladores de tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Sin embargo, tal y como señalan Dounis y Caraiscos [17], este tipo de controladores provocaban que el sistema se volviera inestable si el valor de ganancia escogido era poco acertado. Esto provocó que los diseñadores se derivaran hacia otras técnicas de control más avanzadas como el control óptimo, predictivo y adaptativo.

Tal y como se ha visto en el apartado 3.1.3 [104, 114] y en el apartado 3.1.5 [137], para emplear estrategias de control óptimo es necesario un modelo del edificio. Frente a estos sistemas de control, el uso del microprocesador permite que se introduzcan controladores basados en la lógica difusa o *fuzzy logic*, como el implementado por primera vez en un sistema de aire acondicionado residencial en 1978 [138]. Además, este uso permite el control de diversos elementos de control (Figura 3.50), como el grado de apertura de la válvula electrónica de expansión, la velocidad del compresor y la velocidad de los ventiladores del evaporador y del condensador, de manera simultánea.

Figura 3.50: Esquema de control de aire acondicionado mediante microprocesador. Fuente: Sakamoto [138]

Entre las diferentes técnicas que permiten una mejora en la eficiencia del funcionamiento de los equipos de acondicionamiento Tassou, Marquand y Wilson [139] señalan que, regulando la velocidad del compresor, es posible incrementar más del 10 % la eficiencia de una bomba de calor frente a un sistema convencional. En caso de emplear un control óptimo mediante microprocesador en lugar de un controlador On/Off, la eficiencia puede aumentar un 30 %.

Al poder controlar diferentes parámetros, la complejidad de las estrategias destinadas a mejorar el funcionamiento de las instalaciones de acondicionamiento térmico se fue incrementando. Un ejemplo de ello es el sistema propuesto por Mathews, Botha, Arndt y Malan [140], en el que evalúan la combinación de diferentes estrategias de control para un edificio docente. Entre ellas pueden destacarse el control del *by-pass* de aire en las unidades de acondicionamiento, la gestión horaria del sistema de acondicionamiento (*setback control*), así como el establecimiento de la temperatura del aire de retorno como referencia, en lugar de emplear la de impulsión. Mediante la aplicación de estas medidas, los autores obtienen reducciones de consumo del 60 % y retornos de la inversión de tan sólo nueve meses.

Más recientemente, Boait [141] pone de relieve la necesidad de simplificar o, incluso, eliminar totalmente la intervención del usuario como paso fundamental a la hora de implantar nuevas tecnologías que reduzcan costes, contribuyan al bienestar de sus ocupantes y mejoren la eficiencia energética de los edificios. Por su parte Wood [142] señala que una ventaja adicional de los sistemas de control en los equipos de acondicionamiento es que pueden incluir información hacia el usuario motivándolo para ahorrar energía.

Además de las estrategias de control planteadas en este apartado, existen otras muchas basadas en lógica borrosa asociada a controladores PID, redes neuronales, algoritmos genéticos e inteligencia artificial, que aun siendo de gran interés, quedan fuera del alcance del presente trabajo de investigación. Merecen ser citadas las revisiones de los sistemas de control para la gestión energética y del confort de edificios inteligentes sostenibles llevadas a cabo por Dounis y Caraiscos [17], Chua, Chou, Yang y Jan [143], así como la realizada por Shaikh, Bin Mohd Nor, Nallagownden, Elamvazuthi e Ibrahim [144].

3.1.5. Sistemas solares asociados a sistemas de acondicionamiento

El empleo de un sistema de control en los acristalamientos activos con cámara de agua circulante, no solo permite que estos operen de acuerdo a estrategias de control avanzadas sino que, además, hace posible su combinación con sistemas solares de acondicionamiento, lo que puede suponer un incremento considerable de su eficiencia. Por ello, se ha considerado de interés revisar brevemente algunos sistemas de control empleados específicamente en sistemas de acondicionamiento que hacen uso de energía solar.

El uso combinado de los sistemas solares térmicos asociados a bombas de calor fue estu-

diado por primera vez en 1949 por Sporn y Ambrose [145], empleados de la American Gas and Electric Service Corporation. Estos autores señalan las diversas ventajas que podía aportar la utilización del agua captada en los colectores a los sistemas basados en bombas de calor. Entre ellas destaca el hecho de poder reducir la temperatura de trabajo del colector, lo que implica reducir sus pérdidas y aprovechar la energía solar de baja intensidad que se da a primera hora de la mañana y última de la tarde. Los diferentes ensayos experimentales se desarrollaron entre 1950 y 1955 en un prototipo instalado en un edificio de una planta localizado en New Haven (West Virginia) (Figuras 3.51a y 3.51b), y los resultados ya apuntan a que el uso del sistema solar es capaz de incrementar de manera notable el *Coefficient Of Performance* (COP) de la instalación, frente a un sistema que empleara aire a temperatura ambiente como foco caliente, es decir, frente a un sistema de bomba de calor aire-aire.

Evidentemente, al combinar una instalación de energía solar con una de acondicionamiento, el sistema de control de este prototipo presentaba cierta complejidad. Dicho sistema constaba, entre otros elementos, de una célula fotoeléctrica que limitaba el funcionamiento del compresor a periodos con presencia de luz natural y de limitadores de funcionamiento para temperaturas exteriores muy bajas. Adicionalmente, existían limitadores de seguridad de alta y baja presión para asegurar el correcto funcionamiento del compresor y aprovechar al máximo el sistema de bomba de calor.

(a) Colectores solares

(b) Instalación de la bomba de calor

Figura 3.51: Prototipo de instalación de sistema solar asociado a una bomba de calor. Fuente: Sporn et al. [145].

Ya en la década de 1970, los investigadores japoneses Sakai, Takagi, Terakawa y Ohue [146] describen un sistema basado en una bomba de calor híbrida, que permite emplear aire como fuente de calor durante el día, y agua proveniente de los colectores cuando es de noche o la temperatura ambiente es muy baja. Esto permite reducir el área necesaria de los colectores

Figura 3.52: Diagrama del prototipo de instalación de bomba de calor asociada a un sistema solar. Fuente: Sport y Ambrose [145]

(Figura 3.53).

Otros autores como MacArthur, Palm y Lessmann [137], Freeman, Mitchel y Audit [147] y Lorsch [148] señalan también la posibilidad de emplear la energía captada por los paneles solares en invierno en forma de agua caliente, que no es apta para calefacción directamente, como foco caliente de una bomba de calor.

Para evaluar la contribución de los sistemas solares a los sistemas basados en bombas de calor, Freeman [147] estudia, mediante simulaciones con TRNSYS [149], el rendimiento de tres sistemas solares con diferentes configuraciones: en serie, en paralelo y empleando un doble evaporador. Estos sistemas estaban combinados con bombas de calor empleadas tanto para calefacción como para agua caliente sanitaria.

Más tarde, Kaygusuz [150] estudia una instalación solar para un sistema de calefacción residencial con las mismas configuraciones que los autores anteriores, poniendo de relieve la importancia de controlar la temperatura a la que se pasa de usar el sistema solar a la bomba de calor y viceversa, como aspecto clave para maximizar el ahorro energético de la instalación.

Figura 3.53: Esquema del sistema de bomba de calor acoplada a un sistema solar. Fuente: Sakai et al. [146]

Chaturvedi y Shen [151] proponen el empleo de un variador de frecuencia para regular la velocidad del compresor en un sistema de bomba de calor acoplado a un sistema de energía solar para generar ACS. De esta forma la velocidad del compresor se adapta a la capacidad del colector/evaporador en función de las condiciones ambientales. Los resultados experimentales muestran que tanto el COP de la instalación como la capacidad del colector se ven mejorados cuando la velocidad del compresor aumenta conforme se incrementa la temperatura ambiente. Esta mejora se traduce en un aumento del COP de la bomba de calor desde 2 a 3, y la eficiencia del colector desde el 40 al 70 % cuando se sustituye una unidad *fan-coil* tradicional por un colector/evaporador solar.

Çomaklı, Kaygusuz y Ayhan [152] estudian un sistema compuesto por una bomba de calor híbrida asociada a un colector solar con una superficie de 30 m² y a un sistema de almacenamiento mediante PCM encapsulado para calefactar un edificio de laboratorios de 75 m². La bomba de calor dispone de dos evaporadores, de manera que es capaz de usar como fluido de intercambio tanto el agua almacenada proveniente de los colectores, como aire, en caso de que no haya agua caliente disponible o su temperatura sea muy baja. Además, se dispone de un calefactor eléctrico auxiliar para este último caso. Para la instalación estudiada

el COP estacional medio más alto (4,6) se consigue con la configuración del sistema solar en serie con la bomba de calor (Figura 3.54a), mientras que el mayor ahorro de energía (70 %) lo proporciona la configuración en paralelo (Figura 3.54b). Esto se debe a que en el primer caso la bomba de calor únicamente puede utilizar el agua captada por los colectores en el evaporador, mientras que en el segundo puede emplear simultáneamente tanto esta agua como aire a temperatura ambiente.

(a) Configuración en serie del sistema solar y la bomba de calor

(b) Configuración en paralelo del sistema solar y la bomba de calor

(c) Configuraciones estudiadas de sistemas de bomba de calor combinados con sistemas solares

Por su parte Ito, Miura y Wang [153] estudian el funcionamiento de una bomba de calor asistida por un sistema solar que emplea un colector plano sin vidrio. El sistema fue instalado en una casa prefabricada de madera con ventanas dotadas de cámara y un nivel elevado de aislamiento térmico. En días soleados de invierno, la temperatura del evaporador llega a ser 17°C mayor que la temperatura ambiente, lo que permite alcanzar a la bomba de calor un COP de 5,3. Por tanto, el sistema solar disminuye el consumo eléctrico, aumenta la capacidad de calefacción cuando la temperatura ambiente es baja y hace innecesarios los posibles ciclos de descongelación de la bomba de calor.

Más recientemente, en 2003, Chwieduk [33] resalta el potencial del uso de sistemas de bombas de calor asociados a sistemas solares y al aprovechamiento de energía residual.

3.1.5.a. Relevancia de los sistemas de control en sistemas solares de acondicionamiento

Hasta ahora se ha puesto de manifiesto el aumento en las prestaciones energéticas que pueden alcanzar los sistemas basados en bombas de calor cuando se combinan con instalaciones solares. No obstante, para que ambos sistemas alcancen las condiciones de operación apropiadas se requiere el uso de un sistema de control que los gestione. Martinopoulos y Tsalikis [154] abordan este aspecto e indican que el uso de sistemas solares activos, en combinación con sistemas de acondicionamiento de alta eficiencia como bombas de calor, pueden contribuir significativamente a lograr EECN cuando están dotados de un sistema automático de control.

La necesidad de emplear un sistema de control ha sido puesta de relieve por diferentes autores. Huang y Chyng [155] han estudiado un sistema Integrado de Bomba de Calor y Sistema solar (*Integrated Solar Assisted Heat Pump - ISAHP*) en una sola unidad. Este sistema, basado en un ciclo Rankine de refrigeración y un circuito termosifón integrado, puede emplear tanto aire como agua de los colectores. El equipo fue diseñado para operar a una temperatura de evaporación menor que la temperatura ambiente y en lo que se denomina funcionamiento acoplado o *matched condition*, es decir, empleando un ciclo de compresión tal que a su salida se esté obtenga vapor saturado a una temperatura inferior a 100°C, ya que en estas condiciones se obtienen valores de COP en el rango de 2,5–3,7. Los autores señalan también la importancia de emplear una válvula de expansión electrónica, de tal manera que se mantenga la temperatura de entrada al compresor cerca de la temperatura a la que se obtiene vapor saturado, para obtener así un mayor rendimiento.

Por otro lado, Cervantes y Torres-Reyes [156] llevan a cabo algunos experimentos con una bomba de calor asociada a un sistema solar, realizando además un análisis de energía disponible o exergía del sistema. Estos autores concluyen que el colector, que también actúa como evaporador, es el elemento del sistema en el que se pierde una mayor cantidad de exergía, por lo que para optimizar el sistema es necesario mejorar la eficiencia termodinámica del ciclo reduciendo estas pérdidas. Para ello es necesario emplear un sistema de control automático que, a partir de la temperatura sol-aire como parámetro monitorizado, varíe el flujo de fluido enfriado en el condensador, de tal manera que se minimice la diferencia entre la temperatura de evaporación óptima y la temperatura real de evaporación.

Mediante simulaciones en TRNSYS, Baek, Shin y Yoon [157] analizan un sistema de bomba de calor que, en lugar de emplear un sistema solar como fuente de calor, hace uso de aguas

residuales provenientes de baños públicos y saunas en Corea (Figura 3.55). Estos autores señalan que el uso de la energía calorífica remanente en las aguas residuales mejora el COP de la bomba de calor, y por tanto, sostienen que para optimizar el funcionamiento del sistema es necesario emplear un sistema de control que regule la proporción entre agua caliente residual y agua caliente potable que entra a la bomba de calor. En el caso estudiado, la combinación de estos dos sistemas puede llegar a cubrir el 100 % de las necesidades de ACS durante todo el año, a excepción de los fines de semana en invierno. En este sentido, Meggers y Leibundgut [158] han estudiado mediante simulación un sistema de recuperación del calor contenido en las aguas residuales de viviendas que se almacena en un tanque de recuperación. La energía recuperada se invierte en pre-calentar agua que posteriormente pasa a una bomba de calor que genera agua caliente a mayor temperatura, de tal manera que mediante el apropiado sistema de control pueden llegar a alcanzarse COP de 6,5 cuando el sistema opera de forma que el calor recuperado se corresponde con el aportado a la instalación de ACS.

Figura 3.55: Diagrama de la instalación de agua residuales asociada a una bomba de calor.
Fuente: Baek et al. [157]

La combinación de una bomba de calor de expansión directa asistida por energía solar (*Direct Expansion Solar Assisted Heat Pump* o DX-SAHP) (Figura 3.56) es estudiada por Chaturvedi, Gragani y Abdel-Salam en 2014 mediante simulación [159]. Los autores evalúan el potencial de conservación de la energía del sistema y su viabilidad económica, concluyendo que el sistema (Figura 3.56) tiene una mayor eficiencia y resulta más económico que los calentadores eléctricos tradicionales de agua. Además, sugieren que mediante la optimización del área del colector y el volumen de desplazamiento del compresor se podría eliminar la barrera

económica que supone su uso actualmente. Por otro lado, también apuntan que el sistema basado en una bomba de calor de una sola etapa únicamente es apropiado para producir agua caliente entre 50-70°C, sin embargo deja de ser competitivo si se desea calentar agua a una temperatura mayor de 70°C.

Figura 3.56: Diagrama de la instalación de bomba de calor asistida por energía solar. Fuente: Chaturvedi et al. [159]

Existe una gran variedad de estudios sobre las posibilidades que ofrece la combinación de los sistemas solares con los sistemas de acondicionamiento basados en bombas de calor. Algunas de las revisiones más relevantes son las elaboradas por Hepbasli y Kalinci [160], Amin y Hawlader [161], Omojaro y Breitskopf [162], Hepbasli et al. [163] y Kamel, Fung y Dash [164].

Considerando los ahorros obtenidos por los diversos autores, resulta evidente el interés en desarrollar un sistema de control que permita la interconexión entre los acristalamientos con cámara de agua circulante y los sistemas de acondicionamiento de alta eficiencia, como las bombas de calor.

3.1.6. Fachadas activas y edificios inteligentes

Al hablar de sistemas de control en edificios, no solo debe pensarse en sistemas centralizados de grandes edificios de uso terciario, ya que los termostatos de una instalación de calefacción o aire acondicionado de una vivienda residencial unifamiliar constituyen también un sistema básico de control, que será más o menos elemental en función del tamaño y del equipo de climatización empleado.

Dentro de las diferentes alternativas para lograr las condiciones de confort, destacan los

sistemas de gestión de la energía integrados o *Building Energy Management Systems* (BEMS) que permitan gestionar las instalaciones de una manera mucho más avanzada de lo que permiten los tradicionales termostatos [165].

Loonen, Cóstola, Trčka y Hensen [166], abordan la combinación de ambos factores y realizan una revisión del estado del arte sobre edificios cuyas envolventes, denominadas Envolventes Adaptables al Clima o *Climate Adaptive Building Shells* (CABS), son capaces de variar sus propiedades según las condiciones atmosféricas. Mediante esta expresión los autores pretenden establecer una única designación que englobe los términos referidos a envolventes adaptativas como: activas, avanzadas, inteligentes, interactivas, cinéticas, sensibles, inteligentes o cambiantes, que pueden definirse como aquellas que “tienen la habilidad de cambiar algunas de sus funciones, características o comportamiento de manera repetida y reversible en respuesta a un cambio de los requerimientos o condiciones límite, y lo hace con el objetivo de mejorar el funcionamiento global del edificio”. Además, señalan la necesidad de este tipo de envolventes haciendo hincapié en la posibilidad de cambiar su comportamiento en función de las condiciones ambientales y en el aprovechamiento de las energías renovables. Por otro lado, resaltan las posibilidades de ahorro de energía y mejoras en la calidad del ambiente interior de los edificios mediante el empleo de este tipo de fachadas. Estos autores llevan a cabo una clasificación según cual sea su función principal de la fachada. Existen cuatro categorías: térmicas, ópticas, flujo de aire y eléctricas. Con respecto al control de las envolventes, los autores distinguen entre un control intrínseco, llevado a cabo de manera autónoma por el elemento activo en función únicamente del valor que toma de una determinada variable; y un control extrínseco, en el que la acción de control se lleva a cabo mediante un sistema de control distribuido o centralizado que emplea estrategias de lazo cerrado. Finalmente, los autores concluyen que, dado que la operación de las CABS es compleja, su gestión debe abordarse desde estrategias de supervisión avanzada capaces de evaluar diferentes alternativas, evitando el control basado únicamente en reglas.

Frente a la visión anterior, Favoino et al. [167] mencionan los inconvenientes que presenta el enfoque tradicional basado en la combinación de fachada tradicional con el uso de sistemas activos instalados en el exterior, como limitar parte de la envolvente disponible para la instalación de energías renovables, dificultar la integración arquitectónica los sistemas de energías renovables y aumentar el espacio interior dedicado a las instalaciones. Como alternativa, estos autores proponen Módulos de Fachada Multifuncionales o *Multifunctional Facade Modules* (MFM), que emplean la envolvente como elemento de protección al mismo tiempo que permite la captación de energía. Estos autores proponen una fachada acristalada multifuncional como

un elemento que no solo resulta visualmente atractivo, sino que permitiría ahorrar energía en edificios de consumo casi nulo [168] y ponen de manifiesto la relevancia de los sistemas de control en las fachadas activas, al relacionar de forma inversamente proporcional los ahorros y el tiempo de reacción de la fachada activa.

Al hablar de las fachadas como partes activas del edificio, surge de manera natural la necesidad de dotarlas de un sistema de control que gestione su funcionamiento. El diseño de estos sistemas deberá llevarse a cabo de manera conjunta con el resto de sistemas que configuran el edificio, de forma que este en su conjunto se vea dotado de cierta inteligencia. Esta tarea es asignada a sistemas domóticos o inmóticos que, en edificios de cierta entidad, suelen estar englobados en sistemas denominados Sistemas Automáticos de Control de Edificios o *Building Control Automation Systems* (BACS), entre los que se incluyen los Sistemas de Gestión Energética de los edificios o *Building Energy Management Systems* (BEMS) [136]. Por lo tanto, resulta evidente que la apropiada gestión energética del edificio, asegurando el confort de sus ocupantes con la mayor eficiencia posible, forma parte de los objetivos esenciales que debe cumplir un edificio inteligente. Sin embargo, a pesar de la relación directa entre la eficiencia energética de un edificio activo, el confort de sus ocupantes y el grado de inteligencia de un edificio, no existe una definición unívoca de lo que puede considerarse un edificio inteligente o *smart building* [169].

Así, Kroner [170], entiende esta inteligencia como “la construcción de formas con sistemas integrados que son capaces de anticiparse y responder a los fenómenos, internos y externos, que afectan al rendimiento del edificio, entre las que se encuentran sus necesidades energéticas”. Además, para este autor, el concepto de inteligencia cuando se refiere a edificios activos debe ir a asociado a que el edificio se convierta en un elemento inteligente en sí mismo, y no en un mero aumento de la inteligencia de sus componentes de manera independiente. Es decir, de una forma que no se desconecte la arquitectura de la inteligencia de los sistemas de instalaciones del edificio.

Arkin y Paciuk [171] consideran las definiciones anteriores como incompletas, e inciden en que un edificio sólo podrá considerarse inteligente cuando exista “una respuesta activa de los elementos constructivos tales como muros, fachadas y ventanas” integrada con otros servicios del edificio. Otros autores como Friedewald, Da Costa, Punie, Alahuhta y Heinonen [172] incluyen la gestión de los sistemas de acondicionamiento mediante sistemas domóticos cuando se habla de inteligencia ambiental en los edificios. Por su parte, Wood y Newborough [142] destacan el papel de los usuarios, incidiendo en que el control y la gestión domótica de

los sistemas de acondicionamiento permiten su exhibición en pantallas de una forma simple y agrupada, lo que permitiría además concienciarlos, motivarlos y hacerlos partícipes del ahorro energético logrado.

En esta misma línea, Sala [173] señala la integración de elementos solares en los edificios como elemento clave para aprovechar las energías renovables en su acondicionamiento interior. Este autor propone un aproximación bioclimática a la arquitectura solar. Para ello sugiere una envolvente activa que responda dinámicamente a las condiciones climáticas del entorno mediante fuentes de energías renovables y que dé lugar a unas condiciones interiores aceptables. Además, indica que la integración de elementos multifuncionales en la envolvente puede dar lugar a una reducción de costes en los edificios solares, y que estos elementos deberían funcionar automáticamente para ser efectivos. Apunta además que dichos elementos deberían ser diseñados como componentes estándar, de tal manera que puedan integrarse tanto en edificios de nueva planta como en edificios ya construidos, e incluso en la rehabilitación de edificios históricos. Como aproximación a este tipo de fachadas, propone el concepto de *Active intelligent window (AIW)*, basado en una ventana inteligente dotada de un sistema de control basado en redes neuronales, que es capaz de controlar parámetros como ganancias solares, ventilación, nivel de humedad, nivel de aislamiento e iluminación, con idea de optimizar las condiciones interiores a partir del uso de energías renovables [174].

Por su parte, Atkins [175] indica que los edificios inteligentes deben poseer tres características:

1. Saber qué está ocurriendo en su interior y en su entorno inmediato.
2. Decidir la manera más eficiente de proporcionar un entorno apropiado, confortable y productivo para sus ocupantes.
3. Responder de manera rápida a las peticiones de sus ocupantes.

Para Wigginton y Harris [176] el edificio verdaderamente inteligente debería “estar dotado con algunas de las características que le permitieran aprender, ajustar y responder de manera instintiva a su entorno inmediato para proporcionar condiciones internas de confort y emplear la energía de manera más eficiente”. La fachada activa o inteligente sería, por tanto, una parte intrínseca del edificio inteligente, que llevaría a cabo la función de envolver su interior y podría definirse como “un conjunto de elementos de construcción limitados a la zona más

externa de un edificio, que lleva a cabo funciones ajustadas de manera individual o conjunta, para responder de manera predictiva a variaciones ambientales con el objetivo de mantener el confort con el menor uso posible de energía”. Esta piel forma parte de un sistema del edificio y está conectada con otras partes de la envolvente exterior, como sensores y actuadores, unidas mediante un sistema de conexión y controlada por un sistema de gestión del edificio que actúa como un cerebro.

La propuesta de Doukas, Patlitzianas, Iatropoulos y Psarras [177] va un paso más allá, al aplicar a un edificio típico de oficinas un sistema inteligente de gestión energética basado en un modelo de decisión asistido o *decision support model* (Figura 3.57). En este caso, el sistema permite la monitorización del consumo del edificio transformando la información obtenida en reglas de operación, y más tarde en órdenes electrónicas que son llevadas a cabo por los actuadores. Además, según los autores “la monitorización inteligente del edificio junto con la optimización de la puesta en marcha y parada de los sistemas de acondicionamiento e iluminación permiten al sistema crear perfiles de operación a través del sistema de conocimiento experto, de manera que pueden detectarse y eliminarse decisiones erróneas” . A partir del estudio piloto evaluado, los autores consideran que los modos de operación son satisfactorios y que puede contribuir significativamente tanto al ahorro de energía como al confort interior. Este enfoque da una idea del nivel de complejidad y sofisticación al que podría elevarse el sistema de control para el acristalamiento activo que se propondrá más adelante para el acristalamiento con agua en circulación.

Finalmente, desde el punto de vista de los usuarios, la conveniencia de emplear sistemas de control automáticos para lograr un mayor grado de confort y una reducción del consumo energético queda reflejada a partir diversos autores como Karjalainen y Koistinen [178], o Meier, Aragon, Pfeffer, Perry y Pritoni [179, 180], que han puesto de manifiesto las dificultades que encuentran los usuarios a la hora de manejar un simple termostato, tanto en edificios residenciales como de oficinas. Estas dificultades indican la conveniencia de dotar a las instalaciones de acondicionamiento de un sistema de control automático, sin olvidar que, para lograr los grados de confort más elevados, es recomendable que el usuario pueda mantener cierta capacidad de control mediante la existencia de un modo de funcionamiento manual que pueda activarse en ciertas condiciones [181].

Figura 3.57: Filosofía del modelo de decisión asistido. Fuente: Doukas et al. [177]

3.2. Estado de la técnica

La aplicación de los sistemas activos inteligentes lleva a proponer fachadas dinámicas o activas, capaces de adaptar dinámicamente sus características lumínicas, térmicas o incluso estructurales a las diferentes condiciones ambientales. Dentro de este tipo de fachadas se englobarían además las fachadas interactivas [182] y cinéticas [183] dando lugar a una “arquitectura que reacciona”. Un ejemplo de este tipo de edificio lo constituye la sede del Instituto del Mundo Árabe en París proyectado por Jean Nouvel (Figura 3.58). Este edificio está dotado en su fachada sur de 27000 diafragmas imitando una celosía de tipo *mashrabiya* distribuidos en paneles de 73 elementos, de los que solo 56 son realmente activos [184]. En cada panel, existen dos grupos de diafragmas activos, cada grupo está conectado a un sensor de luminosidad, de tal manera que gradúan su apertura en función de la cantidad de luz exterior. En la Figura 3.59 pueden verse en color rojo los elementos fijos y en azul y amarillo los elementos que forman los dos grupos controlados por los actuadores conectados a los sensores luminosos. En este caso, los diafragmas poseen un sistema de control autónomo basado en un lazo abierto,

es decir, actúan a partir de la señal que reciben del sensor de luminosidad, sin que exista un valor objetivo de consigna con el que comparar la luminosidad resultante una vez se activan los actuadores.

Figura 3.58: Fachada sur del Instituto del Mundo Árabe en París. Fuente: Wikiarquitectura

Figura 3.59: Panel de la fachada sur del Instituto del Mundo Árabe. Fuente: Meagher [184]

Frente a este tipo de protección solar, se plantean sistemas de protección solar más complejos como el empleado en las Torres Al Bahar en Abu Dhabi (Figura 3.60a), proyectado por el estudio Aedas Architects. En este caso, el sistema automático de pantalla solar con forma de una celosía de tipo *mashrabiya* empleado en estas torres supone una notable evolución frente al empleado en el edificio del Mundo Árabe en París, al estar integrado en el Sistema de Gestión Energética del Edificio (BEMS). La pantalla de protección solar está situada a dos metros de la fachada acristalada exterior y rodea a la mayor parte del edificio con excepción de la orientada hacia el norte. Cada uno de los triángulos está fabricado en politetrafluoroetileno (PTFE), conocido comercialmente como Teflón, y recubierto por fibra de vidrio microperforada (Figura

3.60a). Los paneles disponen de un actuador que les permite alternar entre dos posiciones de funcionamiento: abierto o cerrado. La respuesta de apertura y cierre ha sido pre-programada para limitar la radiación solar directa, de manera que se alcancen buenas condiciones de luminosidad interior al mismo tiempo que se evita el deslumbramiento. No obstante, también dispone de una serie de sensores que permiten la protección del edificio mediante la operación de los paneles en caso de que las condiciones climáticas cambien. Se estima que, mediante esta protección solar se reducen las cargas solares en más de un 50 %, con la consiguiente disminución en la demanda energética del edificio, lo que se traduce una reducción de 1750 t CO₂ al año. Esta sobrefachada, junto con otros sistemas de energía renovable empleados en estos edificios, han contribuido a que las torres hayan obtenido la certificación LEED Silver [185].

(a) Vista exterior

(b) Elementos de protección solar

Figura 3.60: Torres Al Bahar, Abu Dhabi. Fuente: Wikiarquitectura [185]

Para dar lugar a este tipo de fachadas avanzadas que se adaptan a las necesidades de los usuarios, autores como Selkowitz [186], plantean que es necesaria una integración entre el diseño, la construcción y su operación. Este autor sostiene también que un edificio sostenible que haga uso de fachadas avanzadas debe poseer un sistema inteligente que gestione los cuatro niveles del funcionamiento dinámico del sistema: la fachada, los ocupantes, el resto del edificio y la red eléctrica. Además, afirma que la nueva generación de fachadas avanzadas incorporará progresivamente elementos dinámicos que provean el control necesario para adaptarse a las condiciones ambientales, incidiendo en la bajada de costes que están experimentando. De esta forma, las nuevas tecnologías y las estrategias de gestión mejoradas permitirán que las fachadas de vidrio pasen de ser percibidas como elementos consumidores de energía a ser elementos gestores de energía en primer lugar, y como elementos proveedores de energía posteriormente.

3.2.1. Cerramientos activos con cámara de agua circulante

Dentro de los diferentes tipos de fachadas activas que se han visto en el apartado 3.1 Estado de investigación son de especial relevancia en el presente trabajo los que emplean un flujo de agua a través de la cámara, por ello se van a estudiar en este apartado.

3.2.1.a. Patentes

A continuación se presentan las patentes de mayor relevancia relacionadas con el control de los acristalamientos activos con agua en circulación.

La primera propuesta de emplear un acristalamiento dotado con una cámara de agua en su interior fue realizada en 1973 por Woods a partir de su patente *Improvements in or relating to liquid filled double glazed units* [187]. Esta patente reivindica una ventana formada por dos paneles de vidrio transparentes capaces de formar una cámara que contiene agua en su interior, y que puede almacenarse en un depósito. Otros ejemplos son las patentes *Solar energy thermalization and storage device* de McClelland [188], que propone un muro formado por acristalamientos que contienen agua en su interior como sistema de almacenamiento pasivo, o la denominada *Improvements in or relating to windows*, que presenta un acristalamiento capaz reducir las cargas interiores mediante la captación de energía solar que posteriormente es disipada, presentada por McKee [189] en 1982.

Aunque estas patentes describen sistemas equipados con agua en circulación entre dos láminas de vidrio o plástico, en ellas no se hace referencia a los sistemas de control empleados. Esto puede deberse, bien a que no necesitan emplearlos, o bien a que no forman parte esencial de la instalación. No obstante, cuando se requiere que el funcionamiento del sistema esté sometido a condiciones específicas, o su uso va asociado a las instalaciones de ACS o de acondicionamiento del edificio, su operación se vuelve más compleja, por lo que el uso de estos sistemas no se concibe sin el empleo de un sistema que se encargue de su gestión. A continuación se presentan algunas patentes que incorporan su correspondiente sistema de control con diferentes grados de complejidad.

En el caso de la instalación para dotar con aire acondicionado un invernadero (Figura 3.61) patentada en 1978 por Chiapale, Damagnez, Denis y Jourdan, se emplea un fluido para

absorber la radiación solar con longitudes de onda mayores de las útiles para el desarrollo de las plantas. Estos autores proponen el empleo de un sistema óptico compuesto por dos muros transparentes que forman el techo del invernadero a través de los que circula un fluido en un circuito cerrado. La energía captada es almacenada en un depósito en forma de agua caliente. Posteriormente, por la noche, cuando la temperatura baja, se hace circular el agua para mantener el invernadero a una temperatura mínima preestablecida. La idea subyacente tras el empleo de un fluido como medio calefactor con cierto desfase temporal es la misma que la planteada para los sistemas solares térmicos, incluidos los acristalamientos activos con cámara de agua circulante. Para bombear el fluido calefactor se utiliza una bomba equipada con un control programable (número 38 en la Figura 3.61 y número 7 en la Figura 3.62a), que tiene en cuenta las condiciones óptimas de temperatura para el crecimiento de las plantas mediante un sensor (número 54 en la Figura 3.61). En este caso, la relevancia del sistema de control radica en que mediante el uso del controlador se consigue que el invernadero se encuentre en todo momento entre los límites de temperatura mínima (T_1) y máxima (T_2), que constituyen el rango de temperaturas apropiadas para el apropiado desarrollo las plantas (línea continua), en lugar de sobrepasarlas tal y como ocurriría en un invernadero tradicional (línea discontinua) (Figura 3.62b).

Figura 3.61: Sistema de aire acondicionado para invernaderos. Fuente: Chiapale et al. [190]

En 1982, Somos, Turi, Zatykó, Gyurós y Borsody [191] patentan un aparato y su proceso asociado para la utilización de energía solar y geotérmica en estructuras de doble capa. Durante el proceso el agua se pulveriza entre dos láminas de material y, debido a la forma de las capas (Figura 3.63), se desplaza hacia el suelo sobre la lámina interior, dirigiéndose al depósito de almacenamiento enterrado. En este caso el sistema de control de temperatura acciona la bomba (número 7 en la Figura 3.63) que impulsa el agua hacia el depósito. El sistema de control permite que el funcionamiento de las bombas se adapte según las condiciones de temperatura en cada momento, de tal forma que cuanto mayor es la temperatura, más elevado es el número

Figura 3.62: Esquema y valores de temperatura del sistema. Fuente: Chiapale et al. [190]

de bombas que entran en funcionamiento para obtener el efecto de enfriamiento deseado.

Figura 3.63: Sistema de utilización de energía geotérmica en estructuras de doble capa. Fuente: Somos et al. [191]

Más tarde, en 1983, Seemann [192], presenta su patente denominada *All season window*, y basada en un acristalamiento con doble cámara en el que emplea el agua como elemento de almacenamiento térmico en la cámara interior o exterior, según la época del año. En ella se usan como elementos de control los limitadores de nivel (número 54 en la Figura 3.64) que hacen uso de los correspondientes sensores (no mostrados en la figura) para accionar o parar la bomba (número 30), de forma que se mantengan los niveles de líquido deseados. Además, se menciona que, al hacer uso de un sistema de control automático, es posible mantener las condiciones ambientales en el interior de la estancia dentro de ciertos límites específicos de confort.

En 1987 Belletti [193] patenta un *Ensamblaje de materiales translúcidos o transparentes*

Figura 3.64: Ventana equipada con vidrio activo con cámara de agua circulante. Fuente: Seemann [192]

laminares de forma que dan lugar a compartimentos que pueden ser llenados o vaciados de líquidos de colores a voluntad, para ser instalados en ventanales o vitrinas. Una de las características de esa patente es que los fluidos se pueden hacer circular de manera inteligente o controlada mediante un sistema de bombeo (números 16 y 17 en la Figura 3.65a), que presenta la opción de ser activado mediante un programador horario (número 18) o un determinado nivel umbral de radiación solar.

Mientras que, en 1994, McKee [194] patenta un sistema estructural, que puede tomar la forma de ventana o pared, y permite la transferencia de energía solar entre el interior y el exterior de un determinado recinto mediante el empleo de dos intercambiadores de calor. Este sistema emplea como controlador dos válvulas termostáticas (números 19 y 21 en la Figura 3.65b) que permiten la circulación del fluido hacia el correspondiente intercambiador de calor, según se desee disipar el calor hacia el exterior (intercambiador de calor número 22) o acondicionar el espacio interior (intercambiador número 20).

Figura 3.65: Patentes de ventana con cámara de agua en circulación. Fuente: Belletti [193] y McKee. [194]

Ya en 2011, Lauret, Giménez-Molina y Ovando [195] patentaron un *Cerramiento para el control de las cargas térmicas de los edificios*. En esta patente se propone un elemento de cerramiento fijado a la estructura del edificio, que forma una cámara por la que circula un fluido. Como novedad frente a todas las patentes mencionadas con anterioridad, esta introduce el uso de un sistema de control domótico (número 16 en la Figura 3.66). Mediante una serie de sensores de temperatura (número 18), el sistema de control actúa sobre la bomba (número 10) y las electroválvulas (número 15) para regular el caudal y la temperatura en el acristalamiento, según las condiciones climáticas del exterior del edificio. Además, el empleo de un sistema de control domótico permite emplear estrategias de control avanzadas del acristalamiento así como su conexión a sistemas de acondicionamiento como bombas de calor.

Figura 3.66: Acristalamiento y sistema de control asociado. Fuente: Lauret et al. [195]

3.2.1.b. Productos en fase prototipo

Respecto a los productos disponibles, o al menos en fase inicial de comercialización, la empresa española IntelliGLASS S.L. [196] dispone de diferentes cerramientos con cámara de agua circulante orientados a diferentes aplicaciones, y destinados a diversos climas. Estos sistemas son los siguientes:

1. RadiaGlass: orientado a su uso en fachadas y cubiertas acristaladas en climas cálidos y templados, y particiones interiores, para calefacción y refrigeración de edificios.
2. iThermGlass: destinado a todo tipo de fachadas y cubiertas acristaladas en climas fríos.
3. RadiaGlass Fotovoltaico: tiene como misión la generación de electricidad en cubiertas y fachadas expuestas a la radiación solar.
4. Captador Solar IntelliGlass para ACS.: permite la generación de agua caliente sanitaria en cubiertas y fachadas expuestas a la radiación solar.

Figura 3.67: Diferentes productos de la empresa IntelliGLASS. Fuente: IntelliGLASS [196]

En relación al intercambio energético del fluido circulante, en la página web de IntelliGLASS [196] se menciona la conexión de los diferentes productos a sistemas geotérmicos como una de las posibilidades. Otras posibilidades serían las basadas en el uso de una instalación enfriamiento gratuito o *free cooling* y posterior acumulación en condiciones de verano, o el calentamiento mediante sistemas de captación solar en condiciones de invierno. También se plantea la homogeneización térmica de las fachadas de un mismo edificio mediante el intercambio de un fluido térmico, que en este caso, obviamente, sería agua.

Figura 3.68: Ejemplo de circuito hidráulico de instalación. Fuente: IntelliGLASS [196]

En cuanto al sistema de control empleado por los diferentes productos de IntelliGLASS, la empresa únicamente menciona que disponen de un “sistema propio de *hardware* y *software* para monitorizar y controlar sus instalaciones”. Según indican brevemente en su página web, dicho sistema les permite realizar las siguientes funciones: medir la temperatura de diferentes partes del circuito primario y secundario en tiempo real, controlar las temperaturas de impulsión y retorno, comprobar el estado de las bombas de circulación y las alertas de fallos en la circulación de las bombas, comprobar el correcto funcionamiento de la instalación, evitar las condensaciones en los vidrios, seleccionar la estrategia más adecuada según el tipo de orientación y construcción, etc. Sin embargo, no se ha encontrado información acerca del empleo de este sistema de control en las instalaciones llevadas a cabo por la empresa.

En lo que se refiere a la implementación de los productos de IntelliGLASS con sistemas de control domóticos, en la página web de la empresa se indica que “conjuntamente con la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad Politécnica de Cataluña, la Fundación i2cat y la empresa Adtel, están explorando nuevas maneras de aprovechar la domótica para la mejora de la climatización. Una de las propuestas investigadas consiste en la climatización personalizada, en la que el edificio es consciente de la presencia de determinadas personas y ajusta la climatización local a sus gustos y preferencias. El resultado es una mejora del confort y un aprovechamiento mejor de la energía”. Sin embargo, no se ha encontrado información acerca de los sistemas de control empleados por la empresa en los edificios equipados con acristalamientos activos con agua en circulación.

No obstante, algunos de los integrantes de la empresa IntelliGLASS han creado recientemente una plataforma genérica de monitorización y control enfocada a su conexión a internet denominada ConecTTo [197] (Figura 3.69). Esta plataforma se encuentra en fase de prototipo, y está compuesta por los siguientes productos:

- AtenTTo Core, se trata de una placa controladora equipada con un microcontrolador ARM Cortex M3, conectividad inalámbrica wifi, interfaz de red Ethernet mediante un conector RJ45 y almacenamiento en tarjeta SD.
- RemoTTo, consiste en un dispositivo de radiofrecuencia que permite controlar las tomas de corriente e interruptores de la instalación eléctrica de una vivienda desde un teléfono inteligente.
- aTTo, es como un dispositivo inalámbrico inteligente compatible con interruptores o conmutadores eléctricos convencionales para la domótica y el control.

Figura 3.69: Componentes de la plataforma Conectto. Fuente: Web Conectto [197]

El interés en el desarrollo de la plataforma Conectto de monitorización, y especialmente de aplicación de la placa AtenTTo. En la Figura 3.70a, se presenta un prototipo de esta placa asociada a un vidrio activo situado en las instalaciones de la empresa (Figura 3.70b).

(a) Placa de control Atentto

(b) Prototipo de vidrio activo

Figura 3.70: Controlador y prototipo de vidrio de IntelliGLASS. Fuente: Archivo propio [196]

3.2.2. Edificios con acristalamientos activos con agua en circulación

A continuación se presentan una serie de edificios representativos ya construidos que disponen de sistemas de fachadas con agua en circulación.

3.2.2.a. Edificio con muro cortina activo en Albacete

Este edificio es sede de la Bioincubadora de empresas en el campus de la Universidad de Castilla La Mancha (Figura 3.71) en Albacete, y está equipado con un muro cortina con triple acristalamiento iThermGlass acoplado a intercambiadores de calor geotérmicos.

(a) Vista exterior

(b) Vista interior

Figura 3.71: Edificio Bioincubadora de empresas - UCLM. Fuente: IntelligGLASS [196]

3.2.2.b. Edificio docente con fachada activa en Cuenca

El edificio docente presentado es el Aulario Polivalente de la Facultad de Periodismo de Universidad Castilla La Mancha, situado en el campus de Cuenca. Este edificio cuenta con una superficie activa de 10 m², a través de la que circula un caudal de 10 l/min. En la Figura 3.72a se muestran diversas partes de la instalación como las conexiones exteriores de las conducciones (Figura 3.72b), el armario de control (Figura 3.73a), la bomba de calor (Figura 3.73b), el sistema de impulsión (Figura 3.73c) o el sistema de filtros de la fachada (Figura 3.73d).

(a) Vista exterior del edificio

(b) Conducciones en la fachada

Figura 3.72: Aulario polivalente Facultad de periodismo - UCLM. Fuente: Intelliglass [196]

(a) Armario de control

(b) Bomba de calor geotérmica

(c) Bombas

(d) Filtros

Figura 3.73: Componentes de la instalación del Aulario Polivalente Periodismo - UCLM. Fuente: Intelliglass [196] y Archivo propio

3.2.2.c. Edificio polivalente en Madarcos

En la localidad madrileña de Madarcos se ha edificado un edificio polivalente con una superficie de 330^2 (Figura 3.74) que emplea como elementos de acondicionamiento una superficie radiante activa de 50^2 formada por paneles activos interiores de Intelliglass, denominados RadiaGlass, asociados a una bomba de calor geotérmica de 10 kW y un COP de 4,2. El proyecto fue desarrollado por SVAM Arquitectos y Consultores, y finalizó en 2012. Desde la empresa Intelliglass se afirma que, a partir de la combinación del uso de los acristalamientos activos con otros sistemas, el edificio ahorra un 60 % de energía en calefacción, con respecto a un sistema de calefacción basado en una caldera de gasoil y un 70 % de energía en refrigeración cuando se compara con una bomba de calor aire-aire [196]. No obstante, en la literatura científica no se han encontrado datos experimentales que permitan justificar estos ahorros.

(a) Vista exterior del edificio

(b) Paneles radiantes interiores

Figura 3.74: Edificio Polivalente en Madarcos (Madrid). Fuente: IntelliGLASS [196]

3.2.2.d. Despacho en la ETS Ingeniería Aeronáutica - UPM

En la ETS de Ingeniería Aeronáutica de la Universidad Politécnica de Madrid se ha instalado un sistema radiante basado unidades RadiaGlass con agua en circulación a través de la cámara (Figura 3.75). Así, uno de los despachos del Departamento de Matemática Aplicada y Estadística cuenta con paneles activos que son empleados por el sistema de climatización para acondicionarlo tanto en condiciones de demanda de calefacción como de refrigeración.

(a) Interior del despacho

(b) Exterior del despacho

Figura 3.75: Despacho en la ETS Ingeniería Aeronáutica. Fuente: IntelliGLASS y Archivo Propio [196]

3.2.2.e. Edificio *BIQ-Haus*

Un edificio singular que emplea agua en circulación en su fachada es la *BIQ-Haus*, también conocida como *Das Algenhaus* o Casa de las Algas, (Figura 3.76) que fue construido en 2013 como parte de la *International Baustellung* (IBA) celebrada ese año en Wilhelmsburg (Hamburgo). Se trata de un edificio residencial de quince apartamentos distribuidos en cuatro plantas diseñado por el estudio SPLITTERWERK de Graz (Austria) y equipado con una fachada biorreactor de 200 m². Esta fachada se denomina *SolarLeaf* [198] y ha sido desarrollada por un consorcio formado por SCC Strategic Science Consult GmbH, Arup Deutschland GmbH y Colt International GmbH (Figura 3.76). El concepto altamente innovador de este edificio hizo que resultara ganador del premio Zumtobel Group Award en 2014, dentro de la categoría de Innovación Aplicada [199].

El edificio posee una fachada dinámica con capacidad para producir energía térmica a partir de algas y energía solar (Figura 3.77). La radiación solar incidente y el dióxido de carbono inyectado en los paneles permiten a las microalgas realizar la fotosíntesis. De esta forma se contribuye al crecimiento de las algas que posteriormente son empleadas como biomasa. Al mismo tiempo se obtiene agua caliente que es aprovechada en los sistemas de acondicionamiento mediante una serie de intercambiadores de calor situados en la sala de instalaciones (Figura 3.78c). El proceso se lleva a cabo en 129 paneles biorreactores, de 2,7 m de alto por 0,7 m de ancho y 0,017 m de fondo, con una capacidad de 24 litros (Figuras 3.78a y 3.78b) instalados en las orientaciones sureste y suroeste. El grado de transparencia de las fachadas puede variar entre el 10 % y el 80 % en función de la cantidad de algas empleadas. Su princi-

Figura 3.76: Fachada activa principal del edificio *BIQ-Haus*

pal inconveniente es que, debido precisamente a la presencia de las microalgas, no es posible obtener paneles completamente transparentes.

La idea subyacente consiste en combinar el uso de energía solar mediante la fachada biorreactor con energía geotérmica asociada a una bomba de calor, dando lugar a un edificio de bajo consumo. Para el crecimiento de las algas se necesita dióxido de carbono que proviene de una instalación de microcogeneración o *Combined Heat and Power* (CHP) que funciona mediante biogás obtenido del tratamiento de las algas. Los reactores están conectados en serie, y pueden ser orientados por el sistema de control para maximizar su rendimiento. El agua que sale de ellos está a unos 35-40°C, por lo que puede emplearse directamente en la calefacción o como ACS pre-calentada. En caso de que exista exceso de producción de energía, esta puede almacenarse en el sistema de geotermia, desde donde posteriormente puede recuperarse y acondicionarse mediante una bomba de calor. Aunque la eficiencia de la fachada como colector solar térmico es del 38 %, frente al 60 % de un panel solar térmico convencional, se espera que este edificio produzca biomasa que genere 30 kWh/m² por año y reduzca en seis toneladas de dióxido de carbono anuales las emisiones del edificio.

Para lograrlo, el edificio está especialmente diseñado para aprovechar la energía de la fachada en otros procesos, y dada la complejidad de los sistemas empleados su integración resulta esencial. Todos los componentes, desde los parámetros bioquímicos de los reactores hasta su orientación, son gestionados mediante un sistema de control de Rockwell Automation e instrumentación de Endress + Hauser [200]. El núcleo del sistema de control es prototipo equipado

con un controlador CompactLogix de Rockwell Automation (Figura 3.78d), que permite la integración entre los controladores, el *software* y los sistemas de E/S. Otros elementos como los intercambiadores de calor y las bombas se gestionan mediante controladores lógicos programables (PLC). Los sistemas de entrada/salida (E/S) se conectan al controlador principal mediante Ethernet/IP, lo que permite su gestión remota por parte de la consultora Strategic Science Consult GmbH. Esta gama de controladores dispone de 16 entradas y 16 salidas digitales, y una memoria de hasta 0,5 MB disponible para el usuario.

Figura 3.77: Detalle de la fachada Solarleaf. Fuente: Colt Limited GmbH [201]

(a) Panel biorreactor

(b) Burbujeo en panel biorreactor

(c) Instalaciones del edificio

(d) Controlador Rockwell CompactLogix

Figura 3.78: Elementos del edificio BIQ-Haus. Fuente: Colt Limited GmbH [201] y Rockwell Automation [200]

3.2.3. Sistemas comerciales de gestión energética en edificios

Hasta ahora, exceptuando la ya comentada *BIQ-Haus*, se han tratado los sistemas de control de las fachadas activas de una forma genérica, sin entrar en detalles concretos de los sistemas empleados. No obstante, parece apropiado mencionar brevemente los principales fabricantes de Sistemas de Gestión Energética de Edificios, y algunos de los productos que proponen. El objetivo es doble, por un lado se quiere señalar que actualmente existen en el mercado productos electrónicos de bajo coste y basados en arquitecturas abiertas, con características similares a los productos comerciales, por lo que, bajo ciertas condiciones, podrían llegar a sustituirlos. Por otro, se pretende mostrar que la interacción entre el sistema de control propuesto en el presente trabajo y los productos comercialmente disponibles por algunas de las empresas líderes en el sector es técnicamente viable.

De acuerdo con un informe de la consultora Navigant Research [202], son 14 los fabricantes de Sistemas de Gestión Energética de Edificios (BEMS) que tienen una mayor presencia en los mercados mundiales (Figura 3.79). Entre ellos, Schneider Electric y Siemens destacan como líderes del mercado. Aunque estas dos compañías tienen una vasta gama de productos orientados a la gestión energética de todo tipo de edificios, en el presente trabajo se van a mostrar algunos de los controladores de estas dos marcas que serían susceptibles de emplearse para el control de un acristalamiento activo con cámara de agua circulante en una vivienda unifamiliar, y que permitirían además su integración en un sistema domótico.

Dentro de la gama de Schneider Electric se ha seleccionado un controlador programable de gama destinado al control de sistemas de acondicionamiento e instalaciones de bombeo residenciales: el Modicon M171P (Figura 3.80). Este controlador con formato de carril DIN puede alimentarse mediante una tensión de 24V (corriente alterna o continua) o de 48V (corriente continua). Está equipado con 27 entradas y salidas (E/S), de ellas 11 son analógicas (5 salidas y 6 entradas), mientras que 7 son salidas digitales (5 relés electromecánicos y 2 relés de estado sólido) y 9 entradas digitales. Las entradas analógicas son configurables (4...20mA, 0...5V, NTC, PT100, etc.), y puede incluir un puerto serie o USB. El equipo puede expandirse hasta con 12 módulos extra y, dependiendo de la versión del producto, incorpora una pantalla integrada o debe conectarse a una pantalla externa para configurar su BIOS. En cuanto a la conectividad, mediante el convertidor adecuado, dispone de interfaces CAN, RS232, RS485, TCP/IP y Ethernet entre otros.

La conectividad de los módulos anteriores les permitiría conectarse a la placa Arduino

Figura 3.79: Posición en el mercado de los principales fabricantes de sistemas de gestión energética para edificios. Fuente: Navigant Research [202]

Figura 3.80: Controlador Schneider Electric Modicon M171P. Fuente: Schneider Electric [203]

Mega empleada en el presente trabajo mediante alguna de las placas adaptadoras RS485, RS232, CAN-Bus o Ethernet que existen para Arduino con un coste que oscila entre de 40-50 euros (Figura 3.81). Alternativamente existen alternativas comerciales basadas en *hardware* de especificaciones abiertas como Industrino [204], orientado a sistemas industriales (Figura 3.82) .

En el caso de Siemens, existe una gama básica de Controladores Lógicos Programables o *Programmable Logic Controller* (PLC) denominada *LOGO!*, orientada al usuario doméstico. La versión actual, denominada *LOGO!8* (Figura 3.83a), dispone de hasta 20 salidas digitales

Figura 3.81: Placas adaptadoras entre diferentes protocolos/buses y Arduino. Fuente: Cooking Hacks [205] y Sparkfun [206].

y 8 analógicas, y posee una memoria de 400 bloques (funciones lógicas o avanzadas). La comunicación se lleva a cabo mediante un puerto Ethernet, por lo que físicamente podría conectarse a una placa Arduino mediante el correspondiente adaptador. No obstante, actualmente no existe una librería de *software* oficial de comunicación entre estos controladores y Arduino. Un controlador más avanzado es el modelo Synco 700 (Figura 3.83b), que emplea el estándar KNX/EIB para comunicarse con el resto de elementos del sistema de control, por lo que sería necesario emplear una placa que disponga de una interfaz KNX/*Twisted Pair - Universal Asynchronous Receive Transmit* (TP-UART) (Figura 3.84).

(a) Módulo Industrino. Fuente: Industrino [204]

(b) Conexiones Industrino. Fuente: Industrino [204]

Figura 3.82: Industrino y sus posibles conexiones. Fuente: Industrino [204]

(a) Módulo LOGO!8

(b) Módulo Symco 700

Figura 3.83: Controladores Siemens. Fuente: Siemens [205]

Figura 3.84: Placa interfaz KNX/TP-UART 2. Fuente: Opternus Components [207]

3.3. Conclusiones del Estado del Arte

A partir de lo expuesto en el Estado de la Técnica y de la Investigación pueden deducirse las siguientes conclusiones:

3.3.1. Relacionadas con el uso de fachadas como elementos captadores activos

El aprovechamiento de las energías renovables, y en particular de la energía solar, así como su adecuado aprovechamiento y gestión, es fundamental para lograr Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN). Para ello, puede hacerse uso de los acristalamientos disponibles en la envolvente del edificio, convirtiéndolos en un elemento dinámico, que puede adaptarse a las necesidades de los habitantes mejorando su confort al mismo tiempo que se mejora la eficiencia energética del edificio.

En este sentido, las fachadas térmicamente activas en general, y aquellas que contienen acristalamientos activos con agua circulante en particular, son capaces de aprovechar la energía solar mejorando de forma significativa la eficiencia energética de los edificios.

3.3.2. Relacionadas con la necesidad del control en las fachadas activas

Para gestionar de manera apropiada el funcionamiento de las fachadas activas, y en particular de aquellas que utilizan cámaras con agua en circulación, es necesario el empleo de sistemas de control automáticos, que deberán actuar conjuntamente con el resto de sistemas domóticos del edificio. La implementación de este tipo de sistemas automáticos de control en sistemas solares y de acondicionamiento permiten llevar a cabo acciones destinadas a mejorar su eficiencia, el confort de los usuarios, así como el mantenimiento y protección de la propia instalación. Además, este tipo de sistemas de control reducen o eliminan la necesidad de intervención de los usuarios, y pueden llevar a una significativa mejora de la eficiencia energética.

Por otro lado, el empleo de microcontroladores en el control de los sistemas de acondicionamiento ha permitido aumentar en gran medida su eficiencia y emplear estrategias basadas en control predictivo, control adaptativo, control basado en lógica borrosa y otros tipos avanzados de control.

En la literatura científica no se han encontrado sistemas de control para fachadas activas con cámara de agua en circulación basados en arquitecturas abiertas y que sean fácilmente accesibles al investigador o al usuario final, por lo que sería de interés disponer de un sistema de control con especificaciones abiertas que permitiera su uso por parte de los investigadores. El hecho de que sea posible integrar las placas Arduino [208], de bajo coste y con especificaciones abiertas, y basadas en microcontroladores programables, con ciertos estándares de conexión domótica disponibles en el mercado mediante las correspondientes pasarelas, hace que se considere una plataforma óptima para desarrollar este tipo de controlador.

Mediante el uso de las correspondientes placas de comunicación y pasarelas es posible comunicar el controlador desarrollado con un sistema de control de edificios basado en estándares disponibles en el mercado, lo que permitiría la integración del acristalamiento activo planteado con equipos destinados al acondicionamiento térmico de alta eficiencia, como bombas de calor, contribuyendo significativamente al aumento de eficiencia energética del edificio.

Los sistemas de automatización y control de los edificios están llamados a tener una importancia creciente en los próximos años, especialmente por su contribución para lograr Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN).

A partir de las conclusiones anteriores se considera de interés el desarrollo de un sistema de control domótico para un acristalamiento activo con cámara de agua circulante y la determinación experimental de la contribución al ahorro energético en los Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN), que constituye el objetivo central del presente trabajo de investigación.

Metodologías documental y experimental

They did not know it was impossible, so they did it.

Mark Twain

El presente capítulo presenta la Metodología Documental que se ha seguido a lo largo del trabajo de investigación, junto con una descripción de la Metodología Experimental empleada.

En primer lugar se muestran diferentes ensayos con módulos o células solares de dimensiones reducidas, que muestran la viabilidad de este tipo de ensayo en la caracterización de diversos tipos de acristalamientos y cerramientos. Posteriormente se describe la instalación experimental y sus componentes, mostrando los diferentes elementos que la componen y la relación entre ellos. A continuación se describe el sistema de control domótico diseñado, construido y evaluado específicamente para este trabajo de investigación, en sus diferentes versiones. Finalmente se describen los distintos ensayos que se han llevado a cabo, ilustrando los modos de funcionamiento del sistema de control domótico junto con sus algoritmos de funcionamiento, así como el procedimiento para cargarlos en el sistema de control.

4.1. Metodología documental

La metodología documental seguida en la elaboración del presente trabajo se ha basado en la búsqueda de referencias bibliográficas relacionadas con los diversos aspectos presentados en el apartado 3.- Estado del arte, mediante las palabras clave apropiadas. Las fuentes bibliográficas consultadas para la elaboración del presente trabajo de investigación han sido las siguientes:

- Artículos de revistas científicas especializadas indexadas en los índices de mayor relevancia como *Science Citation Index* (SCI) e incluidas en las bases de datos del *Journal Citation Report* (JCR) o de *Scopus*. Estos artículos se han obtenido a partir de búsquedas periódicas en la Web of Science [209], *ScienceDirect* de Elsevier [210] y el motor Ingenio de la UPM [211] mediante las palabras clave asociadas a la Tesis.
- Comunicaciones a congresos, tanto de carácter nacional como internacional.
- Patentes, mediante consulta en las bases de datos INVENES de la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM) [212], Latipat-Espacenet [213], Patentscope-WIPO [214] y *Full-Text and Image Database* de la *United States Patent and Trademark Office* (USPTO) [215].
- Normas UNE e ISO, así como el Código Técnico de la Edificación - CTE (Real Decreto 314/2006) [216], el Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios - RITE (Real Decreto 1027/2007) [217], así como los portales de la Agencia Estatal del Boletín Oficial del Estado y EUR-Lex de legislación Europea, en lo que se refiere a normativa técnico-legal .
- Páginas web del Instituto para Diversificación y el Ahorro de Energía (IDAE) [2] para documentación técnica y datos relacionados con el consumo energético de los edificios en España, y de la *International Energy Agency* (IEA) [218] para documentación relacionada con el consumo de energía global.
- Otras fuentes, tales como artículos de divulgación o de revistas no indexadas, hojas de especificaciones técnicas y catálogos comerciales de los componentes y equipos empleados.

4.2. Metodología experimental

La metodología experimental de este trabajo de investigación está basada fundamentalmente en la realización de ensayos experimentales en dos módulos solares cúbicos de tamaño reducido sometidas a diferentes condiciones climáticas derivadas de su exposición a situaciones reales de intemperie. Estos módulos tienen unas dimensiones internas (alto, ancho y fondo) de 0,60 m x 0,60 m x 0,60 m, y externas de 0,95 m x 0,95 m x 0,95 m. Los módulos tienen 5 caras opacas y una acristalada. Uno de los módulos se equipa con el acristalamiento activos con cámara de agua a ensayar, mientras que el otro actúa como módulo de referencia, y está equipado con un vidrio claro monolítico de 6 mm. Los vidrios empleados tienen un área de 0,36 m². Entre las razones que han llevado a escoger un vidrio sencillo como referencia, destaca el hecho de que fue el tipo de vidrio instalado mayoritariamente en los edificios residenciales construidos en España entre las décadas de 1950 y 1980¹. Se trata, por tanto, de un tipo de vidrio con características y prestaciones perfectamente conocidas, que presenta además la ventaja adicional de tener un coste muy reducido. Por otra parte, este tipo de vidrio coincide con el seleccionado como referencia en la Guía Técnica para la Rehabilitación de la Envolvente Térmica de los edificios 5 - Soluciones de Acristalamiento y Cerramiento Acristalado del IDAE [221].

Los ensayos realizados han consistido esencialmente en la toma de medidas de temperatura en diferentes puntos de la instalación, evaluando al mismo tiempo el consumo energético en los prototipos, a través del sistema automático de monitorización y control propuesto.

4.2.1. Antecedentes del método de ensayo empleado

Tal y como se ha indicado con anterioridad, los ensayos se han llevado a cabo en los módulos solares descritos. Este tipo de ensayos es habitual en la caracterización de elementos destinados a su uso en la construcción de edificios, ya que aunque resulta obvio que lo deseable sería llevar a cabo los experimentos en edificios a escala real, el coste que esto supondría lo hace económicamente inviable.

¹Según el IDAE el 58 % de los edificios españoles se ha construido sin ningún criterio de eficiencia, y el 60 % son anteriores a la aplicación de la NBE-CT 79 [219], por lo que puede considerarse que este tipo de edificios cuentan con vidrios monolíticos en sus acristalamientos si no se han sometido a una reforma de mejora de sus prestaciones energéticas [220].

En lo que se refiere a ensayos en módulos a escala reducida, son varios los autores que han empleado módulos con dimensiones externas no superiores a 1,5 m, en estudios térmicos de diferentes tipos de vidrios y muros con resultados satisfactorios. Así, Grimmer, McFarland y Balcomb [222] señalan que módulos de este tamaño (Figura 4.1a) pueden dar lugar a estimaciones razonablemente buenas de sistemas de diseños solares pasivos. Mientras que Ahmad, Bontemps, Salleé y Quenard [223] evalúan en estas kWhs el efecto de emplear paneles rellenos de materiales de cambio de fase (PCM) en los cerramientos (Figura 4.1b), verificando más tarde su comportamiento experimental mediante simulación de manera satisfactoria.

Carbonnier [84] ha ensayado un módulo con una fachada multifuncional que incluye un acristalamiento con agua en circulación, además de varios ventiladores que permiten el intercambio de aire con el exterior y un sistema de lamas verticales orientables, todo ello gestionado por un sistema de control.

Por su parte, Piccolo [224] evalúa las prestaciones que ofrece una ventana inteligente electrocrómica frente a las cargas solares en condiciones reales de intemperie en un módulo de este tipo (Figura 4.1c). En el caso de Carbonari, Fioretti, Noaticchia y Principi estos módulos se emplean para testar un sistema de sombreado líquido [225]. Por otro lado, Giménez-Molina [41] ha analizado el efecto de diferentes vidrios dinámicos sobre el aire interior de un módulo con estas características. Posteriormente Gil-López y Giménez-Molina [43, 44], así como Pérez-Pujazón [85], han estudiado el comportamiento de un acristalamiento activo con cámara de agua en circulación en los mismos módulos empleados en el presente trabajo. Puede verse un resumen de los estudios térmicos llevados a cabo empleando este tipo de módulos en la Tabla 4.1. Por último, Cattarin [226] lleva a cabo una extensa revisión sobre este tipo de ensayos en módulos a escala.

Elemento ensayado	Dimensiones ext. módulo (m)	Autor
Muro alm. pasivo	0,61 x 0,61 x 0,61	Grimmer et al. [222]
Panel PCM	0,9 x 0,9 x 0,9	Ahmad et al. [223]
Vidrio cámara agua	1 x 1 x 1 (est.)	Intelliglass [196]
Vidrio cámara agua	1,1 x 1,1 x 1,1	Carbonnier [84]
Vidrio capa líquida	0,6 x 0,75 x 0,75	Carbonari et al. [225]
Vidrios dinámicos	0,95 x 0,95 x 0,95	Giménez-Molina [41]

Tabla 4.1: Resumen de autores que han empleado módulos de ensayo

(a) Muro de almacenamiento

(b) Panel PCM

(c) Vidrio electrocrómico

(d) Vidrio con capa líquida

(e) Vidrio activo con agua

(f) Vidrio activo con agua

Figura 4.1: Diferentes elementos de fachada ensayados en módulos a escala. Fuente: (a) Grimmer et al. [222], (b) Ahmad [223], (c) Piccolo [224], (d) Carbonari [225], (e) Intelliglass [196] y (f) Carbonnier [84].

4.2.2. Descripción de la instalación experimental y sus componentes

Como se ha indicado anteriormente, la instalación experimental (Figuras 4.2) consta de dos módulos solares, uno equipado con un vidrio activo (Figura 4.3) y otro con un vidrio monolítico de 6 mm, que actúa como módulo de referencia; un depósito de acumulación de agua (1), un sistema de impulsión formado por una o dos bombas circuladoras (2) en función del modo de funcionamiento, un disipador equipado con un ventilador (3), dos resistencias eléctricas calefactoras situadas cada una de ellas en el interior de cada módulo (4), siete electroválvulas (5), un sensor de nivel (6), una fotorresistencia (7) y un número variable de sensores de temperatura (8), dependiendo de la configuración particular del ensayo llevado a cabo.

La instalación experimental ha sido modificada y puesta a punto a partir de una instalación previamente empleada en otros trabajos de investigación desarrollados en la ETS de Arquitectura de Madrid. El montaje experimental utilizado (Figura 4.2) está compuesto por los siguientes elementos:

- Bomba circuladora principal
- Bomba circuladora secundaria
- Electroválvulas
- Depósito de acumulación
- Disipador
- Resistencia eléctrica calefactora

Las características de cada uno de ellos pueden verse en Anexo A.

4.2.2.a. Módulos de ensayo

Los ensayos se han realizado sobre dos módulos solares cúbicos con unas dimensiones internas de 0,6 m x 0,6 m x 0,6 m, y externas de 0,95 m x 0,95 m x 0,95 m (Figura 4.2). La composición de sus cerramientos desde el interior al exterior se detalla en la Tabla 4.2.

Figura 4.2: Vista frontal de la instalación experimental. Fuente: Archivo propio

(a) Detalle módulo vidrio activo

(b) Detalle agua en la cámara

Figura 4.3: Módulos de ensayo. Fuente: Archivo propio

Material	Espesor (m)	k (W/m · K)	ρ (kg/m ³)	Cp (kJ/kg K)
Contrachapado madera	0,004	0,09	300	1,6
Poliestireno extruido	0,16	0,04	25	1,5
Aglomerado madera	0,013	0,14	600	1,7

Tabla 4.2: Composición de los cerramientos opacos de los módulos de ensayo

Los acristalamientos empleados en el caso del vidrio activo han sido tanto adquiridos comercialmente como fabricados *ad hoc* para la presente tesis (Figura 4.5). A pesar de no ser el objetivo principal del presente trabajo de investigación, para obtener unidades completamente resistente a fugas ha resultado imprescindible adquirir los conocimientos necesarios para la correcta ejecución del ensamblaje de las unidades de vidrios activos, así como evaluar las pres-

(a) Sensores de temperatura

(b) Resistencia calefactora

(c) Bomba circuladora

(d) Electroválvula

(e) Disipador

(f) Ventilador del disipador

Figura 4.4: Componentes de la instalación. Fuente: Archivo propio

taciones de sellado de los diferentes productos disponibles en el mercado. Entre los diferentes componentes utilizados, se optó por una silicona bicomponente de curado rápido y neutro indicada para acristalamiento estructural [227], que destacó por las prestaciones ofrecidas.

Figura 4.5: Construcción unidad vidrio. Fuente: Archivo propio

La experiencia adquirida en el desarrollo de las unidades de vidrio activo empleadas en el presente trabajo ha permitido al autor participar en la elaboración de una patente relativa a un cerramiento dinámico para edificaciones cuyo esquema se ilustra en la Figura 4.6. Dicha patente, con nº solicitud P2001530064 [228], permite reforzar y aumentar significativamente su resistencia frente a sobrepresiones ejercidas por el fluido circulante dentro de su cámara interna, incluso si superan varias veces la presión hidrostática, comprendiendo el cerramiento (1) al menos un par de láminas (2), preferentemente de vidrio, transparente o translúcidas, dispuestas en paralelo y entre las cuales se constituye una cámara (3) interna hueca por la que puede circular un fluido con capacidad para absorber y/o liberar calor; un sellado perimetral (4) de la cámara (3) para evitar escapes de fluido; unos conductos (5) para la impulsión y retorno de fluido en la cámara; y una pluralidad de piezas de unión (6), preferentemente metálicas y con forma de doble cono invertido, situadas transversalmente dentro de la cámara (3) interna, contactando cada una de las piezas de unión (6) por sus extremos con ambas láminas (2).

Figura 4.6: Esquema del cerramiento dinámico. Fuente: Pat. Cerramiento Dinámico [228]

4.2.3. Sistema de control domótico

Tal y como se ha descrito en el apartado 3.1.-Estado de la investigación, existen diferentes autores como Platzner [62] y Gil-López junto con Giménez-Molina [43, 44], que han incidido en la necesidad de dotar los acristalamientos activos con cámara de agua circulante con un sistema de control que gobierne su funcionamiento.

Por otro lado, Giménez-Molina [41], una vez analizado el funcionamiento de este tipo de vidrios, plantea en su tesis doctoral cómo, de manera lógica, surge la idea del control del sistema activo para un acristalamiento con cámara de agua circulante. Esto es, una vez que se sabe que mediante estos acristalamientos es posible influir sobre la temperatura de un determinado recinto, se plantea la posibilidad de dotar al sistema de cierta capacidad de automatización, pues su continua operación y supervisión por un operador no resulta viable desde un punto de vista práctico.

Frente al sistema de control genérico propuesto por autores como Gil-López y Giménez-Molina [43, 44], el presente trabajo propone el empleo concreto de un sistema de control programable capaz de tomar decisiones con un cierto nivel de complejidad, como decidir la conveniencia de hacer circular o no el fluido a través de la cámara en cada momento, a partir de las condiciones interiores y del ambiente exterior, sin que de esta forma sea necesaria la supervisión o actuación de un operador.

Este sistema de control del acristalamiento activo planteado no solo permite no combinar su aporte energético con los sistemas de acondicionamiento del edificio [85, 229], sino que resulta ser el elemento clave cuando se desea optimizar su contribución energética a los edificios con el objetivo de alcanzar Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN).

Por tanto, con idea de llevar a cabo las operaciones deseadas en la instalación experimental (accionamiento de sistema de bombeo, apertura y cierre de válvulas, accionamiento del sistema de calefacción y disipación, etc.) se ha diseñado, construido y ensayado un sistema de control domótico *ad hoc* basado en la plataforma de prototipado electrónico Arduino [208] a partir de la idea original propuesta por Millán y Lauret [45]. La elección de esta plataforma se fundamenta en los siguientes puntos:

1. Su filosofía *open-source* o de código abierto, tanto en lo que se refiere al *hardware*

como al *software* necesario para su programación, garantizando una total independencia y disponibilidad con respecto a los fabricantes.

2. Su alta relación calidad/coste, ya que el modelo básico de la plataforma, denominado Arduino Uno, empleado en el primer prototipo del sistema de control tiene un precio aproximado de 20 €.
3. El elevado número de componentes y placas accesorias compatibles con esta plataforma, disponibles a un coste reducido, que permite ir mejorando las prestaciones del sistema e ir aumentado progresivamente su complejidad partiendo de un modelo básico.
4. La disponibilidad de un entorno de programación integrado (*Integrated Development Environment* - IDE) gratuito desarrollado bajo licencia *Creative Commons* [230], y disponible para diferentes sistemas operativos.
5. La utilización de un lenguaje de programación basado en C/C++, junto con el elevado número de bibliotecas existentes para los componentes que forman el sistema de control (sensores, pantallas, registradores de datos, etc.). Esto, junto con la existencia de una amplia comunidad de usuarios, permite la rápida integración y puesta en marcha de los proyectos diseñados.
6. La sencillez de programación de código, así como la existencia de numerosa documentación y recursos didácticos disponibles de manera gratuita, al ser una herramienta dirigida a usuarios sin conocimientos específicos de electrónica.

El sistema de control domótico constituye, de esta forma, un elemento central en el presente trabajo de investigación, ya que demuestra la viabilidad técnica del control domótico de un acristalamiento activo mediante una serie de operaciones llevadas a cabo a partir de un determinado algoritmo programado. Este sistema de control tiene un doble cometido. Por un lado se encarga de la apropiada gestión en tiempo real de la instalación, a partir de los valores de temperatura alcanzados en el interior de los módulos solares de acuerdo al correspondiente algoritmo de control. Mientras que, por otro, se hace cargo de la monitorización y el registro de los datos medidos. De esta forma, se van a evaluar las ventajas que la operación automática podría aportar a los acristalamientos activos con cámara de agua circulante. Además, al tratarse de un sistema programable que permite una monitorización continua, podrían implementarse estrategias de control avanzadas, como las basadas en control adaptativo, de forma que el sistema podría adaptarse a diferentes condiciones climáticas o necesidades de los usuarios, lo que supone una innegable ventaja frente a los tradicionales termostatos y la falta

de confort asociada a ellos [178]. Por último la plataforma escogida permitiría su interconexión con redes cableadas o inalámbricas lo que permitiría su monitorización y gestión remota.

4.2.3.a. Requerimientos del sistema de control domótico

El sistema de control domótico planteado debe de cumplir con los siguientes requisitos establecidos en el apartado 2.2.-Objetivo Principal:

1. Ser capaz de actuar sobre el caudal circulante por la cámara a partir del valor de consigna, establecido según un determinado algoritmo de control.
2. Ser capaz de operar mediante un modo de control manual.
3. Poder integrarse en un sistema de control más complejo.
4. Tener un coste reducido.

Además, este sistema debe ser capaz de llevar a cabo las siguientes acciones:

1. Tomar lecturas de valores de temperatura en diferentes puntos del sistema.
2. Registrar de valores de temperatura leídos.
3. Accionar/detener un sistema de impulsión.
4. Accionar/detener un sistema de disipación térmica.
5. Accionar/detener un sistema de calefacción.
6. Operar la apertura y el cierre de una serie de electroválvulas.

4.2.3.b. Selección de componentes y pruebas

La versión más sencilla de este sistema de control domótico estaba compuesta por los siguientes elementos:

- a) Placa controladora
- b) Placa registradora de datos
- c) Sensores de temperatura
- d) Placa de mando sobre elementos actuadores
- e) Placas de conexiones

Durante la selección de los componentes, y de manera previa al montaje del primer prototipo, se llevaron a cabo algunas pruebas preliminares con objeto de verificar el correcto montaje y funcionamiento de cada uno de los componentes por separado (Figura 4.7).

(a) Sensor temperatura

(b) Registro de datos

(c) Relés y conexiones

Figura 4.7: Pruebas preliminares. Fuente: Archivo propio

4.2.3.c. Primer prototipo

La primera versión del sistema de control domótico (Figura 4.8), constituyó una prueba de concepto del sistema final con las funcionalidades deseadas. Después de una apropiada selección de los componentes, y atendiendo a lo descrito en el apartado 4.1.-Metodología Documental, fue ensamblado con los componentes necesarios para satisfacer los requerimientos iniciales indicados en el apartado 4.2.3.a.- Requerimientos del sistema de control domótico.

Figura 4.8: Primer prototipo del sistema de control. Fuente: Archivo propio.

Este primer prototipo constaba de los siguientes elementos:

- a) Placa controladora: Arduino UNO (Figura B.1) [208]. Se trata de una placa con un microcontrolador ATmega328P con 32 KB de memoria, 14 Entradas/Salidas digitales y 6 entradas analógicas, que tiene un coste aproximado de 20 €.

Figura 4.9: Placa Arduino Uno. Fuente: Arduino [208].

- b) Sensores de temperatura: se han usado sensores Maxim Dallas DS18B20 (Figura B.6) [231], que emplean el protocolo 1-Wire ofreciendo la posibilidad de que varios sensores utilicen la misma línea de comunicación.

(a) Chip del sensor

(b) Versión encapsulada con cable

Figura 4.10: Sensor temperatura DS18B20. Fuente: Archivo propio

c) Placa registradora de datos

Se optó por la placa SD logger de Adafruit (Figura B.7) [232], que incluye un reloj en tiempo real (Real Time Clock) y permite guardar los datos en una tarjeta SD.

d) Placa de 4 relés

En este prototipo las señales desde el controlador hacia los elementos finales de control eran enviadas a través de una placa de 4 relés de SeeedStudio (Figura B.8) [233].

(a) Placa registradora

(b) Placa de relés

Figura 4.11: Placas empleadas en el primer prototipo. Fuentes: Archivo propio y Seeed Studio [233]

- e) Placas de conexiones: con idea de facilitar las conexiones entre los diferentes componentes evitando el cableado, en este primer prototipo se optó por emplear unas placas de conexiones denominadas Mama Shield, de la marca Samurai Circuits (Figura B.9) [234]. Estas placas están formadas por una placa madre y varias placas hijas que se ensamblan en la primera, siendo la placa madre la que va conectada a la placa Arduino.

(a) Placa madre

(b) Placa hija

Figura 4.12: Placas Mama Shield. Fuente: Samurai Circuits [234]

Este primer prototipo disponía de los elementos básicos para controlar la primera configuración de la instalación experimental. No obstante, el aumento del número de operaciones necesarias en las configuraciones más complejas del montaje experimental hicieron que se incrementara la cantidad de código de programación necesario, por lo que la memoria disponible en la Placa UNO suponía una limitación. Por otro lado, al incrementarse el número de componentes del montaje experimental, el número de E/S de la placa se volvió insuficiente. En consecuencia, se decidió construir un segundo prototipo con una placa Arduino con mayor capacidad de memoria y un mayor número de conexiones disponibles.

4.2.3.d. Segundo prototipo

Una vez construido el primer prototipo del sistema de control domótico, y verificado su funcionamiento a partir de la programación en código C/C++, se pasó a evaluar los componentes necesarios para la construcción de un segundo prototipo (Figura 4.13) con características funcionales que permitieran su utilización en el ensayo. En el segundo prototipo la placa controladora pasó a ser una *Arduino MEGA Android Development Kit (ADK)*, además se incorporó una pantalla LCD que ofrecía información sobre el sistema, se emplearon un mayor número de sensores de temperatura, que ahora se conectaban al sistema mediante cajas de conexión RJ-11 y una placa de relés que permitía la conexión de hasta 8 dispositivos.

Figura 4.13: Segundo prototipo del sistema de control. Fuente: Archivo propio

Los componentes de este segundo prototipo que difieren con respecto al primer prototipo son los siguientes:

- a) Placa controladora: Arduino MEGA ADK (Figura B.10) [208]. Esta placa supone un salto cualitativo importante con respecto a la placa Arduino UNO, puesto que pasa a disponer de una memoria de 256 KB, 54 entradas/salidas digitales y 16 entradas analógicas. Además, ofrece la posibilidad de conectarse a cualquier dispositivo que funcione con el sistema operativo Android.

Figura 4.14: Placa Arduino Mega ADK. Fuente: Arduino [208]

- b) Placa de 8 relés: se ha optado por una placa de relés de SainSmart (Figura B.12) [235] que puede controlar hasta 8 dispositivos tanto de corriente alterna como continua.

Figura 4.15: Placa de 8 relés optoaislados. Fuente: Archivo propio

- c) Pantalla: se trata de un módulo de pantalla LCD de Adafruit [232] que permite ofrecer al usuario información sobre el estado en el que se encuentra el sistema en cada momento.

Figura 4.16: Pantalla LCD 16x2 y detalle de su conexión. Fuente: Archivo Propio

- d) Conexiones RJ11 y concentrador: con idea de dotar de robustez y fiabilidad a las conexiones entre los sensores de temperatura y la placa de control, se decide equiparlos con conectores RJ11 de bajo coste (Figura 4.17a), que permiten una conexión sencilla y rápida hasta ella mediante un concentrador (Figura 4.17b).

(a) Conector RJ-11

(b) Concentrador de conectores RJ-11

Figura 4.17: Conectores RJ-11. Fuente: RS Online [236] y Archivo Propio

A pesar de que este segundo prototipo contaba con la mayor parte de los elementos necesarios para monitorizar y controlar el montaje experimental, se observó una cierta falta de

fiabilidad entre sus conexiones con los sensores. Por otro lado, con idea de mejorar su resistencia a las condiciones de intemperie a las que se veía sometida el conjunto de la instalación experimental, se optó por fabricar una nueva versión compacta de tal manera que pudiera instalarse con facilidad dentro de un armario que aumentara su protección.

4.2.3.e. Tercer prototipo

El tercer prototipo se instaló en una caja metálica prefabricada (Figura 4.18) reduciendo considerablemente su tamaño desde la segunda versión, y es el que se ha utilizado para registrar los datos obtenidos en los ensayos experimentales. Tanto la experiencia de uso como el análisis de los resultados obtenidos mediante su uso durante las primeras series de ensayos, llevaron a incluir en él algunos elementos adicionales a los empleados en las versiones anteriores.

(a) Vista frontal

(b) Vista trasera

Figura 4.18: Tercer prototipo. Fuente: Archivo propio

Los elementos adicionales de este prototipo frente a la segunda versión del controlador son los siguientes:

- a) Fotorresistencia: se trata de una resistencia (Figura B.14) [237], que varía su valor en función de la cantidad de luz que recibe. Esta resistencia se ha empleado para determinar si el sistema debía operar en modo diurno o nocturno.

Figura 4.19: Componentes del tercer prototipo. Fuente: Archivo propio

(a) Fotorresistencia

(b) Instalación en el módulo de medida

Figura 4.20: Fotorresistencia y su instalación. Fuente: Cooking Hacks [205] y Archivo propio

- b) Sensor de nivel: se trata de un sensor de ultrasonidos (Figura B.15), que se instaló en la parte superior del tanque de almacenamiento para verificar que el nivel de llenado del tanque de acumulación.

(a) Placa del sensor

(b) Sensor instalado

Figura 4.21: Sensor de nivel mediante ultrasonidos. Fuente: Web Seed Studio

- c) Placa reguladora de motor: se ha optado por una placa de DFRobot [238] capaz de regular la potencia de dos motores. En este caso ha permitido regular la velocidad de la bomba impulsora ajustándola a las necesidades del circuito experimental. Para ello modulaba la señal de salida por ancho de pulso o *Pulse Width Modulation* (PWM) [239].

(a) Placa reguladora

(b) Conexiones de la placa

Figura 4.22: Placa reguladora de la bomba. Fuente: DFRobot [238] y Archivo propio

A modo de resumen, la Tabla 4.3 presenta una comparativa entre los componentes que se han empleado en cada uno de los prototipos descritos. Puede encontrarse información detallada sobre las especificaciones técnicas de cada uno de los componentes utilizados en cada uno de los prototipos en el Anexo B.

Componente	Prototipo 1	Prototipo 2	Prototipo 3
Placa Arduino UNO	X		
Placa Arduino MEGA ADK		X	X
Placa conexiones	X	X	
Placa <i>Datalogger</i>	X	X	X
Placa cont. motor		X	X
Hub conexiones RJ-11		X	X
Módulo 4 relés	X		
Módulo 8 relés		X	X
Pantalla LCD		X	X
Sensor temperatura encapsulado	X	X	X
Sensor ultrasonidos			X
Fotorresistencia			X

Tabla 4.3: Comparación entre los componentes de cada prototipo

La Figura 4.23 muestra un esquema de la relación entre las distintas partes que componen el sistema de control. Finalmente, en la Tabla 4.4 se indica el coste de los distintos componentes del tercer prototipo del sistema de control.

Figura 4.23: Diagrama de bloques del controlador

Componente	Precio (€)
Placa Arduino Mega ADK	~60
Placa <i>datalogger</i> Adafruit	~25
Placa cont. motor DFRobot	~17
Kit pantalla LCD 16x2 Adafruit	~19
Módulo 8 relés	~15
Sensor temperatura encapsulado (DS18B20)	~8
Sensor ultrasonidos (HC-SR04)	~5
Fotorresistencia (LDR)	~2

Tabla 4.4: Coste los componentes del sistema de control

A partir de los elementos añadidos a esta versión del sistema de control domótico, como el sensor de nivel, la fotorresistencia y la placa reguladora de la bomba, se dispone de un sistema completamente funcional adaptado a la instalación experimental, que se considera idóneo para llevar a cabo la toma de datos experimentales. Además, esta versión podría adaptarse de manera sencilla para controlar un acristalamiento en una vivienda unifamiliar real conectándose a una red domótica que empleara componentes comerciales empleando los componentes indicados en el apartado 3.2.3.

Esta tercera versión del prototipo fue instalada en un armario de control junto a los módulos solares (Figura 4.24). En este armario se llevan a cabo todas las conexiones de la placa controladora y proporciona, además, protección al sistema de control a las conexiones frente a los fenómenos atmosféricos. En la Figura 4.25 puede verse un diagrama simplificado del cableado entre los diferentes componentes que constituyen la instalación experimental.

(a) Sist. control y conexiones

(b) Vista frontal

(c) Vista del armario en la instalación experimental

Figura 4.24: Armario de control. Fuente: Archivo propio

En este punto resulta conveniente mencionar que el desarrollo del sistema de control domótico, y el planteamiento de su utilidad en la investigación de sistemas solares como controlador de bajo coste, ha dado lugar a la publicación [229]:

Claros-Marfil, L. J., Padial, J., y Lauret, B. A new and inexpensive open source data acquisition and controller for solar research: Application to a water-flow glazing. *Renewable Energy*, 92:450 – 461, 2016. ISSN 0960-1481.

Figura 4.25: Diagrama de conexiones simplificado

Además, tomando como base el sistema de control descrito, se ha desarrollado la patente [240]:

Claros-Marfil, L. J., Lauret Aguirregabiria, B., Padial, J. F., Ovando Vacarezza, G., Liro-la Pérez, J., Artacho Reinoso, M., Zambrana Pineda, A., y Benítez Díaz, F. Patente - Sistema de control domótico programable con capacidad de gestión energética para cerramiento activo transparente o translúcido, Patente núm. ES2537130A1, 2015.

En esta patente se describe un sistema de control domótico de un acristalamiento activo que puede intercambiar energía con sistemas de energía solar térmica, geotérmica o un sistema de acondicionamiento entre otros. El sistema de control domótico está dotado con diferentes módulos (Figura 4.26) como son: una unidad de control programable (1), una unidad de redes de sensores (2), una unidad de gestión energética (3), una unidad de conexión de sensores (4), una unidad de gestión de actuadores (5), una unidad de registro de datos (6), una fuente de alimentación (7), una unidad de gestión de comunicaciones (8) que permite su conexión con una red exterior (13), un interfaz de usuario (9), una estación meteorológica (10), un elemento concentrador de sensores (11) y un elemento concentrador de actuadores (12).

Figura 4.26: Esquema de los módulos que integran el sistema de control. Fuente: Claros-Marfil et. al [240]

4.3. Puesta en marcha del ensayo experimental

Con idea de optimizar esta puesta en marcha del montaje experimental, se sistematizó el procedimiento estableciendo un protocolo basado en los siguientes pasos (Figura 4.27):

1. Programación algoritmo control
2. Carga del programa de control
3. Instalación del acristalamiento activo
4. Llenado del vidrio
5. Verificación del nivel del depósito
6. Verificación de las conexiones eléctricas e hidráulicas
7. Puesta en marcha del sistema y accionamiento del sistema de control
8. Toma de datos experimentales

(a) Carga del programa

(b) Montaje de vidrio

(c) Llenado vidrio

(d) Comprobación fugas

(e) Verificación nivel deposito

(f) Verificación conexiones

(g) Puesta en marcha

(h) Inicio sistema control

(i) Toma de datos

Figura 4.27: Pasos realización de ensayo. Fuente: Archivo propio

Debido al número de componentes del sistema (Tabla 4.5), y a la necesidad de llevar a cabo la realización de los ensayos en condiciones externas de intemperie, la puesta en marcha de la instalación para la realización de cada uno ellos ha resultado extraordinariamente laboriosa.

Sensores de temperatura	14
Sensores de luminosidad	1
Sensores de nivel	1
Placa control Arduino	1
Placa <i>datalogger</i>	1
Pantalla LCD	1
Placa de relés	1
Placa controladora motor	1
Bombas	1 (dem. calefac.) / 2 (dem. refriger.)
Depósitos almacenamiento	1
Electroválvulas	7
Disipadores	1
Resistencias calefactoras	2

Tabla 4.5: Componentes del sistema de control

4.4. Ensayos experimentales desarrollados

Como se ha puesto de manifiesto anteriormente en el apartado 1.1, una parte importante del consumo energético de los edificios se destina a mantenerlos dentro de unos rangos de confort de temperatura y humedad. Así, los ensayos experimentales realizados han consistido, en esencia, en el registro de una serie de valores de temperatura en diferentes puntos del montaje experimental (Figura 4.28), tales como el módulo de referencia (T_{ref}), el módulo equipado con el acristalamiento con cámara de agua en circulación (T_{cac}), la temperatura del agua almacenada en el tanque (T_{tanque}), o la temperatura ambiente (T_{amb}) en diferentes condiciones de intemperie. Ante estas condiciones, el módulo de ensayo de referencia y el módulo equipado con el acristalamiento con cámara de agua circulante, disponen de varios modos de funcionamiento (Tabla 4.6), dependiendo de si las condiciones del ensayo eran de demanda de calefacción o refrigeración. La elección de cada uno de estos modos de funcionamiento se decide por parte del sistema automático de control de acuerdo al valor de las variables medidas y a los algoritmos programados en él. A partir de estos valores de temperatura se evalúa posteriormente el funcionamiento del acristalamiento activo.

Figura 4.28: Diagrama del montaje experimental

Modos de funcionamiento disponibles		
Cond. Ambientales	Módulo Referencia	Módulo Vidrio Activo
Modo func. Demanda Refrigeración	Apagado	Refrescamiento (D)
		Disipación (D)
Modo func. Demanda Calefacción	Calefacción Apagado	Apagado (D/N)
		Enf. gratuito (N)
		Acumulación (D)
		Calefacción solar (D)
		Calefacción asistida (D/N)
		Calefacción eléctrica (D/N)
		Apagado (D/N)

Tabla 4.6: Modos de funcionamiento de los módulos de ensayo. D: diurno, N: nocturno

Cada uno de los módulos están equipados con una resistencia calefactora de 90 W, descrita en el apartado 4.4. La activación de esta resistencia se hace visible mediante el encendido de

una bombilla LED situada en el interior de cada módulo por parte del sistema de control. Además de activar estas resistencias el sistema registra valores de temperatura, del nivel del depósito y de luminosidad. A modo de ejemplo en la Figura 4.29 puede verse cómo en el módulo de referencia (izquierda) se encuentra activada la resistencia calefactora, mientras que en la equipada con el vidrio activo (derecha) se hace uso del agua acumulada con el conseguiente ahorro de energía. Además, la configuración del montaje experimental es tal que se garantiza que el llenado del vidrio se lleva a cabo mediante la presión suministrada por la columna de líquido del depósito, de tal manera que se eviten roturas derivadas de sobrepresiones en el vidrio.

Figura 4.29: Módulos durante un ensayo. Fuente: Archivo propio

4.4.1. Ensayos preliminares: verificación y prueba del sistema de control

Con idea de verificar el correcto funcionamiento, así como la exactitud de los valores de temperatura obtenidos por el sistema de control, se llevó a cabo un ensayo en el que fueron empleados tanto los sensores de temperatura del sistema de control como *dataloggers* HOBO (modelo H08-032-08) [241] en varios puntos del sistema. Los resultados obtenidos (Figura 4.30) reflejan que, salvo en ciertos momentos puntuales, los valores proporcionados por ambos son muy similares.

En el caso de los valores de temperaturas interiores (T_{ref}) la diferencia media entre ambas temperaturas es de 0,96 °C (Fig. 4.30a). No obstante, existen ciertos puntos en los que se

dan algunas diferencias, alcanzándose una diferencia máxima de hasta 7,16 °C. Estas diferencias pueden deberse a que durante las primeras horas de la tarde la radiación solar incidiera directamente sobre el sensor del sistema de control, al contrario de lo que habría ocurrido con el *datalogger* HOBO que se encontraba protegido por su carcasa en un lugar donde está radiación no alcanzaba.

En lo que se refiere a los valores de temperaturas del tanque de almacenamiento (T_{tanque}) la diferencia media es de 0,55 °C, mientras que la diferencia máxima medida es de 2,81 °C (Figura 4.30b). Esta variación podría deberse al efecto de la variación de temperatura que se da en el tanque como consecuencia de la estratificación térmica en las horas de mayor radiación solar, y las distintas posiciones de la sonda de temperatura del *datalogger* HOBO y el sensor del sistema de control.

Por otro lado, en relación con los valores de temperatura ambiente (T_{amb}), la diferencia media entre los valores del *datalogger* HOBO y el sistema de control es de 0,38 °C (Fig. 4.30c). Hay una diferencia máxima puntual de 4,35 °C que podría deberse al efecto del suelo exterior sobre la carcasa en la que va alojado el *datalogger* al estar situado directamente sobre él, al contrario de lo que ocurre con el sensor del sistema de control, que está situado en el mismo punto pero a una cierta altura.

4.4.2. Tipos de ensayos realizados

Los ensayos realizados se han dividido en dos grupos: ensayos en condiciones de demanda de calefacción, y ensayos en condiciones de demanda de refrigeración. Durante los ensayos en condiciones de invierno, los módulos solares se han orientado hacia el sur donde la intensidad solar es mayor en el solsticio de invierno, con la idea de maximizar la cantidad de radiación solar recibida, mientras que en condiciones de demanda de refrigeración la orientación ha sido oeste, donde la intensidad solar es mayor durante el solsticio de verano, con idea de verificar el funcionamiento del acristalamiento activo en la orientación más desfavorable. En la Figura 4.31 se muestra la radiación solar para cada orientación correspondiente a un año típico en Madrid mediante un archivo climático tipo *Energy Plus Weather Format* (EPW), empleado en el *software* de simulación TRNSYS 17 [242].

Al estar situados los módulos en la cubierta de la ETS de Arquitectura (40°26'23.4"N 3°43'52.2"W), no existen obstáculos que interfieran con la radiación solar.

(a) Valores de interiores del módulo de referencia

(b) Valores de temperatura del tanque de almacenamiento

(c) Valores de temperatura ambiente

Figura 4.30: Comparativa entre los valores de temperatura obtenidos por el sistema de control y por los *dataloggers* HOBO.

(a) Solsticio de verano

(b) Solsticio de invierno

Figura 4.31: Radiación solar sobre el vidrio en los solsticios. Fuente: Archivo propio

Figura 4.32: Vistas desde la cubierta de la ETS Arquitectura. Fuente: Archivo propio

4.4.3. Ensayos en condiciones de demanda de calefacción

El objetivo de estos ensayos realizados en condiciones de demanda de calefacción es evaluar la diferencia de consumo energético empleado por cada módulo para que su temperatura interior logre mantenerse en un rango de temperaturas comprendido entre la temperatura inferior de confort ($T_{comfort-inf}$) y la temperatura superior de confort ($T_{comfort-sup}$) para cuyos valores (Tabla 4.8) se han tomado como referencia los valores de temperatura operativa establecidos en la IT 1.1.4.1.2 del RITE [217]. Así, estos ensayos han consistido en evaluar la eficacia del sistema de control a la hora de reducir el consumo energético destinado a acondicionar el espacio interior de los módulos mediante el empleo, tanto del agua acumulada en el tanque como de las resistencias eléctricas calefactoras. Para ello, el sistema de control convenientemente programado de acuerdo a un algoritmo concreto, se ha encargado de almacenar el excedente energético que se produce en los módulos cuando éstas superan la temperatura superior de confort debido a la radiación solar. Este almacenamiento se ha realizado calentando el agua que circula por la cámara y almacenándola posteriormente en un depósito de 100 l térmicamente aislado. Dado que en condiciones de invierno lo que se pretende es captar la mayor cantidad de radiación solar posible, durante los ensayos en condiciones de invierno los módulos se han orientado hacia el sur.

Estos ensayos contrastan con los realizados por Pérez-Pujazón [85] en los mismos módulos solares que se han empleado en el presente trabajo, en los que se perseguía únicamente determinar la energía acumulada por el depósito cuando el funcionamiento de la bomba es continuo, sin que existieran elementos calefactores ni sistema de control alguno en la instalación. En el presente caso, el sistema de control permite utilizar el agua acumulada únicamente cuando es

necesario, es decir, cuando la temperatura interior del módulo activo (T_{cac}) supera el límite inferior de confort, esto es, cuando

$$T_{cac} < T_{confort-inf}$$

en lugar de hacerla circular continuamente.

4.4.4. Submodos de funcionamiento con demanda de calefacción

En condiciones de demanda de calefacción, si la temperatura interior (T_{ref}) del módulo de referencia es inferior que el límite inferior de confort ($T_{con-inf}$) se activa la resistencia calefactora, mientras que en caso contrario permanece desactivada (Figura 4.33).

Figura 4.33: Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Calefacción - Módulo de referencia

Por el contrario, la programación del sistema de control dispone de cuatro submodos de funcionamiento para el módulo activo:

1. **Submodo Acumulación:** este modo se activa cuando la temperatura interior (T_{cac}) excede la temperatura superior de confort ($T_{confort-sup}$), es decir, cuando se cumple que

$$T_{cac} > T_{confort-sup}$$

En este modo la bomba se pone en funcionamiento, mientras que la válvula V1 permanece abierta (Figura 4.34), por lo que el agua circula por la cámara eliminando parte de la energía almacenada en el aire interior del módulo a la vez que capta parte de la radiación solar incidente.

2. **Submodo Calefacción Solar:** este submodo de funcionamiento se activa cuando la temperatura interior del módulo está por debajo de la temperatura de confort inferior, y al mismo tiempo en el tanque de almacenamiento existe agua almacenada a una temperatura (T_{tanque}) tal que pueda ser aprovechada para calefacción al exceder en una cierta cantidad la temperatura de almacenamiento útil ($T_{alm-util}$), es decir, si se cumple simultáneamente que

$$T_{cac} < T_{confort-inf}$$

$$T_{tanque} > T_{alm-util}$$

3. **Submodo Calefacción Asistida:**

En caso de que la temperatura interior del módulo esté por debajo de la temperatura inferior de confort, pero el agua almacenada no sea apta para ser usada como agente calefactor, esto es, la temperatura del agua almacenada sea inferior a la temperatura de almacenamiento útil $T_{alm-util}$, pero sea superior o igual a temperatura a la que se ha denominado temperatura cámara útil ($T_{cam-util}$), o dicho de otro modo, cuando se cumpla que

$$T_{cac} < T_{confort-inf}$$

$$T_{cam-util} \leq T_{tanque} < T_{alm-util}$$

el sistema entra en Submodo Calefacción Asistida. En este submodo se activa la resistencia eléctrica, a la vez que se hace circular el agua caliente a través de la cámara. De esta forma se disminuye del gradiente de temperatura al que se enfrenta el aire contenido en el interior del módulo de ensayo disminuyendo las pérdidas térmicas.

4. **Submodo Calefacción Eléctrica:** Por último, si la temperatura interior es inferior a la temperatura inferior de confort, y además si la temperatura de almacenamiento es inferior a la temperatura de cámara útil, esto es, si

$$T_{cac} < T_{confort-inf}$$

$$T_{tanque} < T_{cam-util}$$

el sistema acciona el Submodo de Calefacción Eléctrica en el que la resistencia calefactora está conectada, pero no existe circulación de agua a través de la cámara.

5. **Submodo Apagado:** Si la temperatura del módulo se encuentra entre las temperaturas superior e inferior límite de confort,

$$T_{confort-inf} \leq T_{int} \leq T_{confort-sup}$$

el sistema pasa al submodo Apagado.

Figura 4.34: Esquema de circulación del fluido en Modo Demanda de Calefacción

Submodo op.	Bomba	V1	Resistencia Cal.
Acumulación	ON	A	OFF
Calefacción Solar	ON	A	OFF
Calefacción Asistida	ON	A	ON
Calefacción Eléctrica	OFF	C	ON
Apagado	OFF	C	OFF

Tabla 4.7: Submodos de funcionamiento para el Modo Demanda de Calefacción

Variable	Valor
$T_{confort-sup}$	23°C
$T_{confort-inf}$	21°C
$T_{alm-util}$	$T_{confort-sup} + 2^{\circ}\text{C}$
$T_{cam-util}$	$T_{amb} + 2^{\circ}\text{C}$
Intensidad luminosa	25 %

Tabla 4.8: Valores de consigna - Modo Demanda de Calefacción

El estado de la bomba y de cada una de las válvulas que componen el montaje experimental para cada submodo de operación pueden verse en la Tabla 4.7. Los valores de la temperaturas límite de confort inferior y superior, así como la temperatura de almacenamiento útil y la temperatura de cámara útil pueden verse en la Tabla 4.8.

El ciclo de funcionamiento del sistema de control del módulo equipado con la cámara de agua circulante en condiciones de demanda de calefacción se lleva a cabo de acuerdo con el algoritmo de la Figura 4.35. El ciclo comienza con la medida de las temperaturas en distintos puntos del sistema. Si la temperatura del interior del módulo (T_{cac}) es superior a la temperatura de confort superior ($T_{con-sup}$), el sistema activa el **Submodo Acumulación**, en el que se activa la bomba y se abre la válvula V1 (Figura 4.34), de tal manera que el agua empieza a circular desde el tanque hacia la cámara instalada en el módulo solar.

Submodo op.	Condiciones
Acumulación	$T_{int} > T_{confort-sup}$
Calefacción Solar	$T_{int} < T_{confort-inf}$ y $T_{tanque} \geq T_{alm-util}$
Calefacción Asistida	$T_{int} < T_{confort-inf}$ y $T_{cam-util} \leq T_{tanque} < T_{alm-util}$
Calefacción Eléctrica	$T_{int} < T_{confort-inf}$ y $T_{tanque} < T_{cam-util}$
Apagado	$T_{confort-inf} \leq T_{int} \leq T_{confort-sup}$

Tabla 4.9: Resumen funcionamiento submodos - Modo Demanda de calefacción

En el caso de que la temperatura interior se encuentre entre los límites superior e inferior de confort, ($T_{con-sup}$ y $T_{con-inf}$ respectivamente), el sistema pasa al **Submodo Apagado**. Si la temperatura interior cae por debajo del límite inferior de confort, el sistema en primer lugar comprueba si la temperatura del agua almacenada en el depósito se encuentra a una temperatura igual o superior a una cierta temperatura, denominada Temperatura de almacenamiento útil ($T_{alm-util}$), cuyo valor puede verse en la Tabla 4.8. En caso afirmativo se activa el **Submodo Calefacción Solar**. Por el contrario, si el agua almacenada se encuentra a una temperatura inferior a la temperatura útil de almacenamiento, es decir, no es apta para calefactar el espacio interior del módulo, el sistema entra en el **Submodo Calefacción Asistida**. En este modo el sistema activa la resistencia calefactora y, además, comprueba si la temperatura del agua contenida en el tanque, aun siendo inferior a la temperatura útil de almacenamiento ($T_{util-alm}$), es superior a la temperatura útil de cámara ($T_{util-cam}$), de tal forma que sea energéticamente rentable hacer circular el agua almacenada a través de la cámara por la cámara para disminuir el gradiente térmico al que se enfrenta el aire contenido en el interior del módulo.

Por último, si la temperatura del tanque es inferior a la Temperatura útil de cámara, el sistema entra en el **Submodo Calefacción Eléctrica**, en el que la resistencia eléctrica permanece encendida, pero se desconecta la bomba y se cierran las válvulas.

Figura 4.35: Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Calefacción - Módulo activo

La monitorización se lleva a cabo a intervalos regulares de tiempo, de manera que el sistema de control domótico va tomando decisiones en tiempo real. Al mismo tiempo que se toman las acciones de control oportunas, el sistema actúa como un sistema de monitorización, registrando los valores de temperatura, caudal, nivel del depósito, etc., en la tarjeta de memoria SD conectada a la placa Arduino.

4.5. Ensayos en condiciones de Demanda de Refrigeración

El objetivo de los ensayos realizados en condiciones de demanda de refrigeración es evaluar la diferencia entre las temperaturas internas del módulo dotado con el acristalamiento activo con agua en circulación (T_{cac}) y el módulo de referencia equipado con el vidrio de sencillo (T_{ref}).

No obstante, al contrario de lo que ocurría en el caso anterior, ahora no se dispone de equipo alguno de generación de frío. Por ello, los ensayos en condiciones de demanda de refrigeración han consistido en determinar la eficacia del sistema de control a la hora de reducir la temperatura del espacio interior de los módulos mediante la circulación de agua a menor temperatura que la ambiente a través de la cámara. Para ello, el sistema de control, actuando de acuerdo a un algoritmo previamente programado (Figura 4.39), se ha encargado de disminuir la temperatura del agua almacenada en el depósito aislado en las horas nocturnas, de tal forma que pudiera emplearse como medio de enfriamiento en las horas diurnas con alta radiación solar. Para determinar la eficacia del acristalamiento como medio de atemperamiento térmico y refrescamiento, durante los ensayos en condiciones de verano los módulos se han orientado hacia el oeste, que es la orientación más desfavorable al presentar la mayor cantidad de radiación solar directa incidente (Figura 4.31).

El ciclo de funcionamiento del sistema de control del módulo equipado con la cámara de agua circulante en condiciones de demanda de refrigeración se lleva a cabo de acuerdo con el algoritmo de la Figura 4.39. Al igual que se ha hecho en condiciones de demanda de calefacción, el primer paso consiste en medir las temperaturas en distintos puntos del sistema. A partir de un cierto valor de luz natural, el sistema selecciona el Modo Diurno. A continuación se determina si la temperatura en el interior del módulo equipado con el acristalamiento activo supera el límite superior de confort ($T_{con-sup}$). Si no se cumple esta condición el sistema de

control pasa al **Submodo Apagado**; por el contrario, si la temperatura es superior al límite superior de confort ($T_{con-sup}$), el sistema comprueba si el agua almacenada en el depósito es susceptible de emplearse como medio refrescante. Para ello, la temperatura del agua acumulada en el depósito (T_{acu}) debe ser menor que la temperatura máxima de refresco ($T_{max-ref}$). Si esta última condición se cumple el **Submodo Refrescamiento** es activado poniéndose en funcionamiento la bomba y abriéndose las válvulas correspondientes a este modo de operación (Tabla 4.10). En caso contrario, el agua almacenada no es apta para refrigerar el módulo, por lo que el sistema activa el **Submodo Disipación** (Tabla 4.10).

Este ensayo difiere de los ensayos realizados por Pérez-Pujazón [85], en los que el agua circulaba de manera continua a través de la cámara y, tanto las operaciones de activación del equipo disipador como las de enfriamiento gratuito, debían llevarse a cabo de manera manual, basándose únicamente en criterios horarios bajo la intervención de un operador.

4.5.1. Submodos de funcionamiento en Modo Demanda de Refrigeración

El sistema dispone de 4 submodos de funcionamiento. El estado de cada componente del montaje experimental para cada uno de ellos puede verse en la Tabla 4.10. En el funcionamiento en modo demanda de refrigeración, el sistema determina en primer lugar, mediante nivel de luminosidad dado por la fotorresistencia (Figura B.14), si debe seleccionarse el submodo diurno o el submodo nocturno de acuerdo a los niveles de consigna establecidos (Tabla 4.12). Dentro del Submodo Diurno, el sistema dispone de tres submodos de operación:

1. **Submodo refrescamiento:** En este modo se activa cuando la temperatura en el interior del módulo (T_{int}) es mayor que la temperatura límite superior de confort ($T_{conf-sup}$), es decir,

$$T_{int} > T_{conf-sup}$$

y, al mismo tiempo, la temperatura del agua disponible en el depósito (T_{tanque}) es inferior a la temperatura máxima de refrescamiento, esto es

$$T_{tanque} < T_{max-ref}$$

El recorrido del fluido a lo largo de la instalación en este modo se ilustra en la Figura 4.36.

2. **Submodo Apagado:** El sistema selecciona el modo apagado cuando la temperatura es inferior al límite superior de confort.

$$T_{int} \leq T_{confort-sup}$$

3. **Submodo Disipación:** En caso de que la temperatura en el interior del módulo supere el límite superior de confort y el agua almacenada no sea apta para refrescar, esto es

$$T_{int} > T_{confort-sup}$$

$$T_{tanque} \geq T_{max-ref}$$

el sistema selecciona el submodo disipación. En este caso el recorrido del fluido en el montaje experimental se muestra en la Figura 4.37.

Por otro lado, dentro del Submodo Nocturno, el sistema dispone de otros dos submodos de funcionamiento:

4. **Submodo Enfriamiento Gratuito:** este modo de funcionamiento también conocido como *free cooling* consiste en aprovechar la ausencia de radiación y la consecuente disminución nocturna de temperaturas para enfriar el agua contenida en el depósito a cierta temperatura por encima de la temperatura ambiente, haciéndola pasar por el disipador. Así, para que se active este modo debe cumplirse que

$$T_{tanque} > T_{amb}$$

De esta manera, el enfriamiento se lleva a cabo empleando únicamente la bomba que hacer circular el agua por el radiador, y su correspondiente ventilador. El recorrido del fluido en la instalación en este caso puede verse en la Figura 4.38.

5. **Submodo Apagado:** En caso de que no se cumpla la condición anterior para seleccionar el Submodo Enf. Gratuito, el sistema pasa al Submodo Apagado, ya que son los dos únicos submodos nocturnos disponibles.

Figura 4.36: Esquema de circulación del fluido en el Submodo Refrescamiento para Condiciones de Demanda de Refrigeración

Figura 4.37: Esquema de circulación del fluido en el Submodo Disipación para Condiciones de Demanda de Refrigeración

Figura 4.38: Esquema de circulación del fluido en el Submodo Enfriamiento Gratuito en Condiciones de Demanda de Refrigeración

Submodo	Bomba	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	Vent.
Refrescamiento	ON	A	A	A	A	C	C	C	OFF
Disipación	ON	C	A	A	C	C	A	C	ON
Enf. gratuito	ON	C	C	C	A	A	C	A	OFF
Apagado	OFF	C	C	C	C	C	C	C	OFF

Tabla 4.10: Tabla de funcionamiento para el Modo Demanda de Refrigeración

Submodo op.	Condiciones	Disponibilidad
Refrescamiento	$T_{int} > T_{confort-sup}$	Diurno
	$T_{tanque} < T_{max-ref}$	
Disipación	$T_{int} > T_{confort-sup}$	Diurno
	$T_{tanque} \geq T_{max-ref}$	
Enf. gratuito	$T_{tanque} \geq T_{amb}$	Nocturno
Apagado	$T_{int} \leq T_{confort-sup}$ (D)	Diurno
	$T_{tanque} \leq T_{amb}$ (N)	
		Nocturno

Tabla 4.11: Resumen condiciones funcionamiento submodos - Modo Demanda de Refrigeración

Variable	Valor
$T_{confort-sup}$	25°C
$T_{alm-util}$	$T_{amb}-2^{\circ}\text{C}$
Intensidad luz solar	25 %

Tabla 4.12: Valores de consigna - Modo Demanda de Refrigeración

En la Tabla 4.13 se observan los modos de operación del sistema de control. Mientras que en la Figura 4.39 se presenta el algoritmo de control en Modo Demanda de Refrigeración.

Demanda	Modo operacion	Acción control prototipo
Refrigeración	Refrescamiento	Accionar bomba
		Accionar válvulas
	Disipación	Accionar bomba
		Accionar válvulas
		Accionar disipador

	Calefacción gratuita	Accionar bomba
Calefacción	Calefacción asistida	Activar bomba Accionar resistencia calef.
	Calefacción eléctrica	Accionar resistencia calef.

Tabla 4.13: Submodos de funcionamiento disponibles del sistema de control

Figura 4.39: Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Refrigeración - Módulo activo

4.6. Programación y carga del código programado

Una vez establecidos los modos de funcionamiento del sistema de control, y definidas las acciones que han de llevarse a cabo en cada uno de ellos, es necesario implementarlo en lenguaje de programación C/C++ en el IDE de Arduino (Figura B.2) y más tarde cargarlo en la placa.

```
DB18S20_2_sensores | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
DB18S20_2_sensores
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
// Data wire is plugged into pin 2 on the Arduino
#define ONE_WIRE_BUS 6
#define ledrojoPin 7 // Pin 7 conectado a led rojo
#define relayPin 5 // Pin 5 conectado a rele
// Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices (not just Maxim/Dallas temperature ICs)
float temp1=0, temp2=0; // Variables para guardar temperaturas
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
// Pass our oneWire reference to Dallas Temperature.
DallasTemperature sensors(&oneWire);
void setup(void)
{
  // start serial port
  Serial.println("Estableciendo comunicacion...");
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Leyendo temperaturas...");
  // Start up the library
  sensors.begin();
  pinMode(ledrojoPin, OUTPUT); // Establece el pin ledrojoPin como salida
  pinMode(relayPin, OUTPUT); // Establece el pin relayPin como salida
}
void loop(void)
{
  // call sensors.requestTemperatures() to issue a global temperature
```

Figura 4.40: IDE de Arduino. Fuente: Archivo propio

El código se guarda en archivos con la extensión “.ino” denominados *sketchs*, y se envían desde un ordenador hacia la placa mediante un cable USB. La secuencia típica de los programas que se han empleado en el presente trabajo se muestra en la Figura 4.41.

Figura 4.41: Diagrama de flujo del código de programación

4.7. Condicionantes de operación

Las principales dificultades en la realización de los ensayos han estado relacionadas con la necesidad de mantener tanto la integridad como la estanqueidad de las unidades de vidrio con cámara de agua y las conducciones de manera satisfactoria. Las posibles roturas por sobrepresiones son uno de los inconvenientes que presentan este tipo de vidrios (Figura 4.42).

(a) Rotura vidrio sencillo

(b) Rotura de vidrio laminar

Figura 4.42: Rotura de vidrios activos. Fuente: Archivo propio

Lejos de afectar solo a los prototipos, se han encontrado roturas en edificios reales, y más concretamente en el Aulario Polivalente de la Universidad de Castilla la Mancha situado en el Campus de Cuenca (Figura 4.43).

(a) Rotura de vidrio en edificio real

(b) Detalle de rotura de vidrio

Figura 4.43: Rotura en edificio real. Fuente: Archivo propio

Como respuesta a estos inconvenientes, el de control domótico propuesto por el autor del presente trabajo en la patente *Sistema de control domótico programable con capacidad de gestión energética para cerramiento activo transparente o translúcido* [240], dispone de un sistema capaz de medir y controlar la presión en este tipo de vidrios que evitaría este tipo de roturas. Además, la experiencia acumulada a lo largo de la fase de desarrollo experimental de los ensayos ha permitido al autor colaborar en la redacción de la patente *Cerramiento dinámico para edificaciones* [228], con número de solicitud P2001530064, que incluye una serie de piezas de unión destinada a mejorar la resistencia mecánica de este tipo de vidrios activos.

4.8. Conclusiones parciales en cuanto a las metodologías documental y experimental

A partir de las tareas de selección, montaje, programación y pruebas del sistema propuesto en los diferentes experimentos, puede afirmarse que es posible construir un sistema de monitorización y control de bajo coste, basado en la plataforma de *hardware* libre Arduino y complementado mediante componentes de *hardware* adicionales basados en código abierto, con prestaciones similares a las que tendrían controladores y *dataloggers* comerciales orientados al sector residencial. Este sistema es capaz de llevar a cabo acciones de monitorización y control de forma automática en tiempo real, de acuerdo a un algoritmo previamente programado, sin la necesidad de la intervención de un operador.

En este sentido el sistema propuesto, al estar basado en *hardware* y *software* de especificaciones abiertas (*open source*), asegura en la práctica la disponibilidad de componentes y permite un alto grado de personalización del controlador a un precio muy reducido, lo que resulta de gran interés frente a los controladores y *dataloggers* comerciales. Por otro lado, queda patente que el uso de un microcontrolador programable permite adoptar estrategias avanzadas de control del acristalamiento activo, que además pueden actualizarse de manera sencilla cuantas veces sea necesario. En lo que se refiere a las prestaciones del sistema de monitorización, tanto su precisión como su fiabilidad pueden considerarse análogas a la de un *datalogger* comercial, ofreciendo al usuario la posibilidad de visualizar los datos en tiempo real, o ser capaz de enviarlos a través de una red de comunicaciones, además de añadir sistemas de seguridad, por ejemplo contra la rotura de unidades de vidrio por sobrepresiones transitorias. Así, puede afirmarse la viabilidad técnica de un control domótico como el propuesto a un coste razonable.

Dada la similitud entre el principio de funcionamiento del acristalamiento activo y otros sistemas basados en energías renovables, tales como colectores solares térmicos, el uso del sistema propuesto sería aplicable al control avanzado de este tipo de instalaciones solares, siendo posible su uso tanto en instalaciones experimentales de investigación como en edificios de tamaño reducido bajo condiciones reales de operación.

Metodología y primeros resultados de modelado

Essentially, all models are wrong, but some are useful.

George E.P. Box

Este capítulo presenta en primer lugar un modelo unidimensional propio desarrollado para el módulo solar experimental equipado con el acristalamiento activo con agua en circulación. Se trata de un modelo unidimensional que emplea un término de retardo para considerar el efecto del agua acumulada sobre el ambiente interior del módulo solar. Pese a considerar el mecanismo de conducción como el único presente, da lugar a un buen ajuste entre los valores numéricos de temperatura y los obtenidos experimentalmente para el interior del módulo en el reducido periodo de tiempo considerado.

A continuación se incluyen dos modelos del acristalamiento activo, con diferente grado de complejidad, denominados Modelo Detallado y Modelo Simplificado. Partiendo de la idea original de implementar un modelo para el acristalamiento activo en TRNSYS mediante un *Type* propio, la dificultad de resolver el sistema de ecuaciones diferenciales resultantes del Modelo Detallado en este programa de simulación ha hecho recomendable el empleo del Modelo Simplificado en su lugar.

5.1. Modelo del módulo solar experimental

Con idea de determinar la influencia que el acristalamiento activo con agua en circulación ejerce sobre el ambiente interior del módulo empleado en los ensayos, se presenta a continuación un modelo que evalúa el efecto del flujo de agua a través de la cámara en determinadas condiciones. Más concretamente, el modelo desarrollado se ha planteado para el Modo de funcionamiento denominado Calefacción Asistida (apartado 4.4.4), que consiste en aportar energía al ambiente interior del módulo tanto mediante el agua que circula a través de la cámara, como a partir de una resistencia calefactora.

Este modelo no solo se refiere al acristalamiento sino que incluye el módulo solar completo. Concretamente se trata de un modelo unidimensional del módulo solar, en el que cada capa de su sección transversal se representa por un segmento en el eje x (Figura 5.2). Considerando que las propiedades físicas de los materiales con los que se ha construido el módulo permanecen constantes a lo largo del tiempo, la ecuación de transferencia de calor para un fluido incompresible, despreciando la transferencia de calor por radiación, los efectos de presión y el rozamiento viscoso viene dado por la ecuación

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u}(\nabla \cdot T) \right) = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + \dot{q} \quad (5.1)$$

si además se admite que la velocidad es lo suficientemente pequeña para despreciar el término convectivo, la ecuación se reduce a

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + \dot{q}. \quad (5.2)$$

Considerando que las propiedades físicas son diferentes para cada material, el valor de la densidad (ρ), la capacidad calorífica (C_p), y la conductividad térmica k cambia para cada punto del dominio (Ω). Además, es necesario tener en cuenta que la temperatura del aire interior del módulo no cambia sólo en el espacio, sino que también lo hace dinámicamente a lo largo del tiempo. Para considerar la influencia de la transferencia de calor desde la cámara hacia el ambiente interior se ha introducido un término de retardo (s) en el término fuente de temperatura. Este retardo se corresponde con el tiempo total que un volumen dado de agua

necesitaría para llegar desde el tanque de almacenamiento hasta la cámara del vidrio activo. De esta forma, el problema en una dimensión puede ser descrito mediante la ecuación

$$\rho(x)c_p(x)\frac{\partial T}{\partial t}(x,t) - \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x)\frac{\partial T}{\partial x}(x,t) \right) = f(x,t,s,T(x,t-s)) \quad (x,t) \in \Omega \times (0,\infty) \quad (5.3)$$

donde $\Omega =]0, L[$ y L es la longitud de la sección transversal del módulo. Por otro lado, las condiciones inicial y de contorno serán

$$C.I. \quad T(x,t) = T_0(x,t), \quad x \in \Omega, \quad t \in (-s,0)$$

$$C.C. \quad T(0,t) = T_{ext}(t), \quad T(L,t) = T_{ext}(t), \quad t > 0$$

donde T es la temperatura del aire dentro del módulo y T_{ext} es la temperatura exterior.

Debe considerarse que, para evitar el modelado del tanque de agua aislado que contiene el agua templada que va a circular por la cámara, el término fuente $f(t,s,x,T(x,t-s))$ se refiere al periodo de tiempo que el agua necesita para fluir desde el tanque hasta el vidrio activo, considerado como retardo (s). Este término fuente debe incluir dos partes, por un lado la energía aportada por la resistencia calefactora cuando está activada, y por otro la energía aportada por el flujo del agua almacenada que incluye el término de retardo indicado. Mientras que las diferentes capas que componen el módulo solar se presentan en la Figura 5.1.

El problema parabólico (ec. 5.3) con condiciones Dirichlet ha sido resuelto empleando diferencias finitas para la derivada con respecto al tiempo y elementos finitos respecto del espacio. Respecto a la discretización espacial adoptada, en la Figura 5.2 se presentan los dominios correspondientes a las capas de la Figura 5.1.

Para resolver el problema descrito (ecuación 5.3), en primer lugar se aplica el método de las diferencias finitas empleando un esquema progresivo

$$\frac{\rho c_p (T(t+h) - T(t))}{h_t} - \text{div}(k \cdot \nabla T(t+h)) = f(x,t,s,T(t-s)) \quad (5.4)$$

Figura 5.1: Esquema bidimensional del módulo (no escalado).

- 1. Vidrio exterior, 2. Agua en circulación,
- 3. Vidrio interior, 4. Aire interior,
- 5. Aislamiento.

Figura 5.2: Dominios de la discretización espacial unidimensional

Una vez que se obtiene la ecuación en diferencias (ec. 5.5), que depende únicamente del espacio, se resuelve mediante elementos lineales aplicando el método de Galerkin de elementos finitos:

$$\int_{\Omega} \rho c_p W \cdot \varphi + h_t \int_{\Omega} k \nabla W \cdot \nabla \varphi dx = \int_{\Omega} F \cdot \varphi dx, \quad (5.5)$$

donde $W = T - T_{|\partial\Omega}$. La función F contiene todos los términos del término del lado derecho de la ecuación que aparecen tras la discretización, mientras que φ es una función test que pertenece a la base de los elementos finitos.

Para evaluar el modelo desarrollado se ha llevado a cabo una comparación entre los valores de temperatura obtenidos numéricamente frente a los datos experimentales. Como ejemplo,

en la Figura 5.3 se presenta la comparación entre los valores del modelo y los proporcionados por un sensor de temperatura situado a 15 cm del vidrio interior (T15).

Cuando el efecto del agua templada, incluyendo el término de retardo, se introduce en el término fuente, los valores que proporciona el modelo son muy parecidos a los valores experimentales tal y como puede apreciarse en la Figura 5.3a. Sin embargo, cuando el término fuente no se considera, lo que indicaría que no existe fuente de calor alguna, la temperatura interior tiende al valor de temperatura exterior (Figura 5.3b), como cabría esperar.

(a) Modelo con retardo en el término fuente

(b) Modelo sin término fuente

Figura 5.3: Temperatura del módulo para el sensor T15

Figura 5.4: Comparación entre temperaturas del modelo y experimentales para el sensor T15

A pesar de que únicamente se ha llevado un análisis comparativo de los resultados del modelo durante un corto periodo de tiempo (30 minutos). Es interesante resaltar como la curva de temperatura del modelo reproduce el patrón experimental (Figura 5.3a), y poner de relieve el buen ajuste que proporciona el empleo del término de retardo.

La diferencia entre ambas curvas (Figura 5.3) podría deberse a los mecanismos de convección y radiación no considerados, que en este caso parecen tener un papel secundario frente a la transmisión por conducción, dada la elevada conductividad térmica del vidrio; así como a los errores experimentales de medida. Por lo tanto, puede afirmarse que el modelo desarrollado empleando el retardo proporciona una buena coincidencia entre con los datos experimentales a pesar de ser un modelo sencillo unidimensional sometido a las simplificaciones descritas.

5.2. Modelos de los acristalamientos activos con agua en circulación

La reducción de la energía solar incidente producida por un vidrio depende fundamentalmente del flujo de energía (q) que atraviesa el acristalamiento y llega al interior de una determinada estancia. Este flujo está relacionado con la transmitancia térmica (U) y el factor solar (g), que caracterizan térmicamente un acristalamiento. El valor de este flujo para un vidrio estático viene dado por la ecuación 5.6 [243].

$$q = U \cdot (T_e - T_i) + g \cdot I \quad (5.6)$$

siendo:

q , el flujo de energía que llega al interior del recinto en el que está instalado el acristalamiento (W/m^2).

U , la transmitancia térmica del acristalamiento (W/m^2K)

T_e , la temperatura exterior (K)

T_i , la temperatura interior (K)

g , el factor solar o SHGC (*Solar Gain Heat Coefficient*)

I , la radiación solar incidente total (W/m^2)

En este sentido, la principal característica que ofrece el acristalamiento activo con agua en circulación consiste en la reducción de las ganancias solares, lo que contribuye a lograr un ambiente interior con un mayor grado de confort de manera dinámica.

Sin embargo, al contrario de lo que ocurre en un vidrio estático, en un vidrio dinámico los valores de U y g no pueden considerarse constantes en el tiempo, sino que varían en función de una determinada variable, como la intensidad de corriente en un vidrio electrocrómico o la velocidad de circulación del agua en este caso.

En el caso de los acristalamientos con cámara de agua en circulación, el flujo de energía hacia el interior de un recinto determinado viene dado por la ecuación 5.7.

$$q = U \cdot (T_e - T_i) + g \cdot I + U_{agua} \cdot (T_w - T_i) \quad (5.7)$$

donde:

U_{agua} , es el coeficiente de transmisión de calor desde la cámara de agua hacia el ambiente interior, que tiene en cuenta la transmisión por convección y por radiación (W/m^2K).

T_w , es la temperatura media del agua que circula por la cámara (K).

Actualmente no se ha encontrado ningún software de simulación energética de edificios en el que sea posible la simulación de un acristalamiento activo con cámara de agua en circulación. Esto es debido esencialmente a que en los modelos matemáticos de los acristalamientos implementados en estos programas los balances de energía suponen que la energía incidente en el vidrio (E_{inc}) debe ser igual a la suma de la energía que se transfiere al interior (E_{trans}), la que se absorbe en los vidrios (E_{abs}) y la que se refleja hacia el exterior (E_{ref})¹, tal y como ocurre en los acristalamientos convencionales (ecuación 5.8).

¹En realidad la energía absorbida en los vidrios o en la cámara es re-emitida, por lo que no existe un almacenamiento o salida neta real de energía, al contrario de lo que ocurre en el caso de los acristalamientos con agua en circulación.

$$E_{inc} = E_{trans} + E_{abs} + E_{ref} \quad (5.8)$$

Sin embargo, en los acristalamientos equipados con una cámara de agua en circulación parte de la energía que atraviesa la parte de más externa del acristalamiento (o la más interna en caso de haya pérdidas desde el interior), es captada, o emitida, por el agua en circulación. Por lo tanto, en este caso el balance energético del acristalamiento necesita un término adicional (E_{agua}) que tome en consideración este fenómeno (ecuación 5.9).

$$E_{inc} = E_{trans} + E_{abs} + E_{ref} + E_{agua} \quad (5.9)$$

Esto en la práctica supone que dichos programas no estén diseñados para tener el cuenta término que incluye U_{agua} de la ecuación 5.7.

A pesar ello, existen algunas aproximaciones para la simulación de este tipo de acristalamientos llevadas a cabo por diversos autores. Así, Chow, Li y Clarke [86], han realizado algunas simulaciones de este tipo de vidrio activos mediante el software de simulación energética ESP-r [244]. Para lograrlo, en primer lugar han diseñado un acristalamiento estático *ad hoc* en el programa WINDOW [245], desarrollado por el *Lawrence Berkeley National Laboratory* de EEUU. Más tarde han implementado el vidrio diseñado en ESP-r [246], modificando a su vez los coeficientes de transferencia térmica con objeto de simular la cámara de agua como una *zona* del edificio. Otros autores, como Gil-López y Giménez-Molina, han realizado simulaciones de periodos inferiores a un día en programas multifísicos de elementos finitos [43]. Más recientemente Sierra y Hernández han desarrollado a partir de modelos simplificados expresiones generales para acristalamientos activos con configuraciones de dos y tres cámaras [247].

De esta forma, la idea original de este trabajo es desarrollar un elemento que permita la simulación de los acristalamientos activos con agua en circulación en TRNSYS [242]. Para ello, sería necesario necesario desarrollar y programar el modelo obtenido en un *Type* propio de TRNSYS.

5.2.1. Modelo detallado

Según lo expuesto, para poder considerar el efecto de este tipo de vidrios en los programas de simulación energética de edificios es necesario implementar en ellos los modelos existentes para este tipo de acristalamientos. En este caso se va a presentar el modelo planteado por Chow (Figura 5.5) [65, 88], modificado a partir del modelo propuesto por este autor para una ventana ventilada [248], que a su vez fue validado de acuerdo al modelo original desarrollado por Ismail y Henríquez [249].

Figura 5.5: Balance de energía de un vidrio con agua en circulación. Fuente: Chow et al. [65]

$$G = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11} \quad (5.10)$$

$$Q_1 = \gamma_{e1} G \quad (5.11)$$

$$Q_2 = \tau_e G \quad (5.12)$$

$$Q_3 = h_{c,1}(T_{gout} - T_{amb}) \quad (5.13)$$

$$Q_4 = h_{c,4}(T_{gin} - T_{rm}) \quad (5.14)$$

$$Q_5 = h_{r,1}(T_{gout} - T_{amb}) \quad (5.15)$$

$$Q_6 = h_{r,4}(T_{gin} - T_{rm}) \quad (5.16)$$

$$Q_7 = \rho_{gout} D_{gout} C_{gout} \frac{dT_{gout}}{dt} \quad (5.17)$$

$$Q_8 = \rho_{gin} D_{gin} C_{gin} \frac{dT_{gin}}{dt} \quad (5.18)$$

$$Q_9 = \rho_w \delta_w C_w \frac{dT_w}{dt} \quad (5.19)$$

$$\dot{m}_w = \rho_w v_w A_w \quad (5.20)$$

$$Q_{10} = \frac{\dot{m}_w C_w (T_{w,out} - T_{w,in})}{A_g} \quad (5.21)$$

$$Q_{11} = h_{r,2-3}(T_{g2} - T_{g3}) \quad (5.22)$$

$$h_{c,1} = 2,8 + 3,0 v_{wind} \quad (5.23)$$

$$\Theta_{amb} = T_{amb} + 273,15 \quad (5.24)$$

$$\Theta_{gout} = T_{gout} + 273,15 \quad (5.25)$$

$$h_{r,1} = \frac{\sigma(\Theta_{amb}^2 + \Theta_{gout}^2)(\Theta_{amb} + \Theta_{gout})}{\frac{1}{\varepsilon_{amb}} + \frac{1}{\varepsilon_{g,1}} - 1} \quad (5.26)$$

$$h_{r,2-3} = \frac{\sigma(\Theta_{g,2}^2 + \Theta_{g,3}^2)(\Theta_{g,2} + \Theta_{g,3})}{\frac{1}{\varepsilon_{g,2}} + \frac{1}{\varepsilon_{g,3}} - 1} \quad (5.27)$$

$$h_{r,4} = \varepsilon_{g,4} \sigma(\Theta_{gin}^2 + \Theta_{rm}^2)(\Theta_{gin} + \Theta_{rm}) \quad (\text{A partir de la eq.5.26 y suponiendo } \varepsilon_{rm} = 1) \quad (5.28)$$

La determinación del número de Nusselt depende directamente del régimen de flujo del fluido. Por lo tanto:

1. Para flujo no desarrollado

$$Nu_e = 1,86 (Re_d Pr)^{1/3} \left(\frac{d_w}{L_w} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_w}{\mu_g} \right)^{0,14} \quad (5.29)$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (5.30)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (5.31)$$

2. Mientras que en caso de flujo totalmente desarrollado

$$Nu = 7,541 \quad (5.32)$$

Por otro lado, la radiación solar incidente puede descomponerse en varios términos:

$$G = G_{ref} + G_{trans} + G_{out} + G_w + G_{in} \quad (5.33)$$

$$G_{ref} = \gamma_{eff} G \quad (5.34)$$

$$G_{trans} = \tau_{eff} G \quad (5.35)$$

$$G_{out} = \alpha_{out} G \quad (5.36)$$

$$G_w = \alpha_w G \quad (5.37)$$

$$G_{in} = \alpha_{in} G \quad (5.38)$$

Sustituyendo los valores de las coeficientes de transmisión de calor, los balances al vidrio exterior, a la cámara de agua y al vidrio interior dan lugar a las ecuaciones 5.39, 5.40 y 5.41 respectivamente.

$$\begin{aligned} \alpha_{out} G = & \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{c,1}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} \right) (T_{out} - T_a) + h_{r,1} (T_{out} - T_a) \\ & + \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{2,w}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} \right) (T_{out} - T_w) + \rho_{out} D_{out} C_{out} \frac{dT_{out}}{dt} \end{aligned} \quad (5.39)$$

$$\begin{aligned} \alpha_w G = & \rho_w \delta_w C_w \frac{dT_w}{dt} + \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{2,w}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} \right) (T_{out} - T_w) \\ & + \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{3,w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right) (T_{in} - T_w) + \rho_w v_w C_w (T_{w,out} - T_{w,in}) \end{aligned} \quad (5.40)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{in} G = & \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{c,4}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right) (T_{in} - T_{rm}) + h_{r,4} (T_{in} - T_{rm}) \\ & + \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{3,w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right) (T_{in} - T_w) + \rho_{in} D_{in} C_{in} \frac{dT_{in}}{dt} \end{aligned} \quad (5.41)$$

Si se despejan las temperaturas del vidrio exterior T_{out} , del agua (T_w) y del vidrio interior T_{in} se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} T_w = & \frac{1}{\left(\frac{1}{\frac{1}{h_{2,w}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} + h_{r1} + \frac{1}{\frac{1}{h_{3,w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right)} \left[\rho_w \delta_w C_w \frac{dT_w}{dt} - \alpha_w G \right. \\ & + T_{gout} \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{2,w}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} \right) + T_{gin} \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{3,w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right) \\ & \left. + \dot{m}_w C_w (T_{w,out} - T_{w,in}) \right] \end{aligned} \quad (5.42)$$

$$T_{gin} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\frac{1}{h_{c4}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} + h_{r4} + \frac{1}{\frac{1}{h_{3,w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right)} [\alpha_{in} G +$$

$$T_{rm} \left(\left(\frac{1}{\frac{1}{h_{c,4}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right) + h_{r4} \right) + T_w \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{3,w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{un}}} \right) -$$

$$\rho_{in} D_{in} C_{in} \frac{dT_{gin}}{dt}] \quad (5.43)$$

$$T_{w,out} = \frac{1}{\dot{m}_w C_w} \left[(\alpha_w G - \rho_w \delta_w C_w \frac{dT_w}{dt} - \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{2,w}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} \right) (T_{out} - T_w) \right.$$

$$\left. - \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{3,w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right) (T_{in} - T_w) + \dot{m}_w C_w T_{w,in} \right] \quad (5.44)$$

Tabla 5.1: Variables y parámetros del modelo planteado

D	espesor de la cámara, (m)
d_h	diámetro hidráulico, (m)
G	radiación solar total horizontal [82], (W/m^2)
h	coeficiente de transmisión de calor, ($W/(m^2K)$)
k	conductividad térmica, ($W/(mK)$)
T	temperatura, (K)
v	velocidad, (m/s)
$\dot{m}_w$	caudal de fluido, (kg/s)
γ_{e1}	reflectancia solar
τ_e	transmitancia solar efectiva
α	absorbancia solar
δ_w	espesor de la capa de agua, (m)
ϵ	emisividad
Θ	variación de temperatura, (K)
ρ	densidad, (kg/m^3)
C	capacidad calorífica, ($J/kg K$)
A_g	área del acristalamiento, (m^2)
A_w	sección de paso de la cámara, (m^2)
P_w	perímetro mojado de la cámara, (m)
L_w	longitud del acristalamiento, (m)
W_w	anchura del acristalamiento, (m)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann: $5,67 \cdot 10^{-8}$ ($W/(m^2K^4)$)

Tabla 5.2: Subíndices empleados en las ecuaciones

1	superficie exterior del vidrio exterior
2	superficie interior del vidrio exterior
3	superficie exterior del vidrio interior
4	superficie interior del vidrio interior
<i>a</i>	aire
<i>c</i>	convección
<i>r</i>	radiación
<i>in</i>	superficie interior
<i>out</i>	superficie exterior
<i>rm</i>	ambiente interior
<i>w</i>	agua
<i>wind</i>	viento

Para facilitar la resolución del sistema se presenta como un sistema de ecuaciones diferenciales lineales,

$$\frac{dT_{gout}}{dt}(t) = r_1(t) T_{gout}(t) + r_2(t) T_w(t) + r_3(t) \quad (5.45)$$

$$\frac{dT_w}{dt}(t) = s_1(t) T_{gout}(t) + s_2(t) T_w(t) + s_3(t) T_{gin}(t) + s_6(t) \quad (5.46)$$

$$\frac{dT_{gin}}{dt}(t) = t_1(t) T_{gin}(t) + t_2(t) T_w(t) + t_3(t) \quad (5.47)$$

donde

$$r_1 = \frac{- \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{\frac{1}{h_{c1}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} + h_{r1} + \frac{1}{\frac{1}{h_{2,w}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} \right)} \right)}{\rho_{out} D_{out} C_{out}} \quad (5.48)$$

$$r_2 = \frac{\left(\frac{1}{\frac{1}{h_{2w}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} \right)}{\rho_{out} D_{out} C_{out}} \quad (5.49)$$

$$r_3 = \frac{\alpha_{out} G + T_{amb} \left[\left(\frac{1}{\frac{1}{h_{c1}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} \right) + h_{r1} \right]}{\rho_{out} D_{out} C_{out}} \quad (5.50)$$

$$s_1 = \frac{\left(\frac{1}{\frac{1}{h_{2w}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} + h_{r1} + \frac{1}{\frac{1}{h_{3,w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right)}{\rho_w \delta_w C_w} \quad (5.51)$$

$$s_2 = \frac{- \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{2w}} + 0,5 \frac{D_{out}}{k_{out}}} \right)}{\rho_w \delta_w C_w} \quad (5.52)$$

$$s_3 = \frac{- \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{3w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right)}{\rho_w \delta_w C_w} \quad (5.53)$$

$$s_4 = \frac{-\dot{m}_w}{\rho_w \delta_w} \quad (5.54)$$

$$s_5 = \frac{\alpha_w G}{\rho_w \delta_w C_w} + T_{w,in} \left(\frac{-\dot{m}_w}{\rho_w \delta_w} \right) \quad (5.55)$$

$$s_6 = \frac{\alpha_w G}{\rho_w \delta_w C_w} + (T_{w,out} - T_{w,in}) \left(\frac{\dot{m}_w}{\rho_w \delta_w} \right) \quad (5.56)$$

$$t_1 = \frac{- \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{\frac{1}{h_{c4}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} + h_{r4} + \frac{1}{\frac{1}{h_{3,w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right)} \right)}{\rho_{in} D_{in} C_{in}} \quad (5.57)$$

$$t_2 = \frac{\left(\frac{1}{\frac{1}{h_{3w}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right)}{\rho_{in} D_{in} C_{in}} \quad (5.58)$$

$$t_3 = \frac{\alpha_{in} G + T_{rm} \left[\left(\frac{1}{\frac{1}{h_{c4}} + 0,5 \frac{D_{in}}{k_{in}}} \right) + h_{r4} \right]}{\rho_{in} D_{in} C_{in}} \quad (5.59)$$

El sistema anterior da lugar a la siguiente representación matricial

$$\begin{pmatrix} \frac{dT_{gout}}{dt} \\ \frac{dT_w}{dt} \\ \frac{dT_{gin}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1(T_{gout}) & r_2 & 0 \\ s_1(T_{gout}) & s_2 & s_3 \\ 0 & t_2 & t_1(T_{gin}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{gout}(t) \\ T_w(t) \\ T_{gin}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_3(T_{gout}) \\ s_6 \\ t_3(T_{gin}) \end{pmatrix} \quad (5.60)$$

Al no permitir TRNSYS la resolución directa de sistemas de ecuaciones no lineales acopladas, la resolución del sistema planteado debería resolverse mediante técnicas numéricas en un programa matemático específico. Por ello se ha entendido que dicha implementación de dicho sistema excede el alcance del presente trabajo.

5.2.2. Modelo simplificado

Dada la complejidad del sistema resultante para el Modelo Detallado, se ha optado por hacer uso de un modelo más sencillo. Para ello, se ha implementado el modelo simplificado propuesto por Sierra y Hernández [247], a partir del propuesto por Chow [87]. Así, los primeros proponen una simplificación del modelo descrito en el apartado anterior a partir de la aceptación de una serie de hipótesis relativas a la transferencia de calor en el acristalamiento. Este modelo ha sido validado a partir de los resultados de Chow [87] obteniéndose unas inferiores al 6 % en las ganancias internas y menor del 15 % en las ganancias energéticas del agua en circulación.

La primera de estas condiciones consiste en asumir que la temperatura del agua (T_w) es uniforme a lo largo del acristalamiento (Figura 5.6), y que el intercambio de energía con los vidrios que componen la cámara sigue la Ley de enfriamiento de Newton (ec. 5.61).

$$q_{conv} = h_c (T_{surface} - T_{fluid}) \quad (5.61)$$

donde h_c es el coeficiente de convección, que se supone constante para un flujo másico ($\dot{m}$) dado. Por otro lado, se asume que la temperatura del agua que entra en la cámara (

Figura 5.6: Flujos de calor en un vidrio activo con cámara de agua. Fuente: Sierra y Hernández [247]

T_{ent}) es uniforme y que el flujo másico ($\dot{m}$) es constante. Finalmente se supone que la masa térmica de la cámara de agua es despreciable al cambiar sus condiciones mucho más rápido que las condiciones ambientales de radiación y temperatura.

En cuanto a la transmisión de calor por radiación, se supone que los coeficientes de transmisión (h_r) son constantes, por lo que pueden combinarse con los coeficientes de convección (h_c) en un coeficiente global (h_g), de tal forma que

$$h_g = h_c + h_r \quad (5.62)$$

Finalmente debe asumirse que la temperatura de los vidrios es uniforme, y que su conductividad es tan tal que la resistencia térmica despreciable frente a los fenómenos de conducción y radiación es despreciable.

A partir de todas las hipótesis anteriores, para un vidrio formado por una sola cámara, el modelo se reduce a las siguientes ecuaciones

$$q_2 = q_1 + A_1 i_o \quad (5.63)$$

$$q_3 = q_2 + A_w i_o + \dot{m}c (\theta_{in} - \theta_w) \quad (5.64)$$

$$q_4 = q_3 + A_2 i_o \quad (5.65)$$

por otro lado, los flujos de energía entre cada capa, y entre las capas de los extremos y los ambientes exterior e interior, dan lugar a las expresiones:

$$q_1 = h_e (\theta_e - \theta_1) \quad (5.66)$$

$$q_2 = h_w (\theta_1 - \theta_w) \quad (5.67)$$

$$q_3 = h_w (\theta_w - \theta_2) \quad (5.68)$$

$$q_4 = h_i (\theta_2 - \theta_i) \quad (5.69)$$

De manera que se tiene un sistema de siete ecuaciones lineales, con siete incógnitas (Tabla 5.3), considerablemente más sencillo de resolver que el Modelo detallado descrito en el apartado anterior.

Tabla 5.3: Variables a determinar

Variable	Descripción
q_1	flujo de calor desde el ambiente exterior al vidrio exterior, (W/m^2)
q_2	flujo de calor desde el vidrio exterior a la cámara, (W/m^2)
q_3	flujo de calor desde la cámara al vidrio interior, (W/m^2)
q_4	flujo de calor desde el vidrio interior al ambiente interior, (W/m^2)
θ_i	temperatura interior, (K)
θ_e	temperatura ambiente, (K)
θ_w	temperatura del agua en la cámara, (K)
θ_1	temperatura vidrio exterior, (K)
θ_2	temperatura vidrio interior, (K)

La aplicación del simplificado implica la determinación de los parámetros necesarios para resolver el sistema de ecuaciones planteado en el caso concreto del Taller Docente estudiado.

Así, el coeficiente convección entre la cámara de agua y el vidrio (h_w) viene dado por la ecuación:

$$h_w = \frac{k}{d_h} Nu \quad (5.70)$$

siendo k la conductividad del agua $(W/m \text{ K})$, d_w el diámetro hidráulico de la cámara (m) y Nu el número adimensional de Nusselt.

Dada la elevada relación entre el ancho promedio de los vidrios (W_w) y de la cámara (δ_w)

$$\frac{W_w}{\delta_w} \simeq 266 \quad (5.71)$$

y considerando que el agua fluye por efecto de la gravedad, puede asumirse que el régimen de flujo es laminar ($Re < 2300$), por lo que puede suponerse que $Nu=7,45$ [250], tal y como consideran Chow y Li [88].

Por otro lado, el diámetro hidráulico d_h viene dado por la ecuación

$$d_h = \frac{4 A_w}{P_w} \quad (5.72)$$

donde A_w es el área transversal del paso del fluido (m^2) y P_w es el perímetro mojado (m), que vienen dados por las ecuaciones 5.73 y 5.74 respectivamente:

$$A_w = W_w \delta_w \quad (5.73)$$

$$P_w = 2 W_w + 2 \delta_w \quad (5.74)$$

Tomando un valor de $k = 0,644 (W/mK)$ para la conductividad térmica del agua, suponiendo un espesor de cámara de 12 mm, y teniendo en cuenta las dimensiones de los vidrios del taller, se obtiene un coeficiente promedio $h_w = 200 (W/m^2K)$.

Una vez que se conocen los parámetros indicados y, dado que TRNSYS es capaz de resolver algunas de las ecuaciones planteadas, únicamente se van a utilizar las ecuaciones necesarias para determinar la temperatura del salida de agua de la cámara (θ_w):

$$q_3 = q_4 - A_2 i_o \quad (5.75)$$

$$q_3 = h_w (\theta_w - \theta_2) \quad (5.76)$$

$$q_4 = h_i (\theta_2 - \theta_i) \quad (5.77)$$

Por lo que, reordenando, se alcanza la expresión temperatura de salida del agua de la cámara que debe implementarse en el software de simulación:

$$\theta_w = \theta_{in} - \left(\frac{q_3 - q_2 - A_w i_o}{\dot{m}c} \right) \quad (5.78)$$

5.3. Conclusiones parciales en cuanto a la metodología de modelado

Se ha desarrollado un modelo unidimensional del módulo solar experimental completo. Este modelo, que considera únicamente la transmisión de calor por conducción, e incluye un término fuente con retardo para tomar en consideración el efecto del agua templada con la que se alimenta el vidrio en el ambiente interior del módulo, se ajusta de manera razonable a los valores experimentales de temperatura.

Diferentes autores han propuesto modelos con grados de complejidad y detalle variable para los vidrios activos con agua en circulación. En primer lugar se ha considerado un Modelo Detallado, que da lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, lo que dificulta su implementación y resolución en TRNSYS [242].

Por otro lado, admitiendo una serie de hipótesis para el Modelo Detallado, puede obtenerse un Modelo Simplificado en forma de sistema de ecuaciones algebraicas cuya implementación en el software de simulación TRNSYS resulta considerablemente más sencilla. Este modelo ha sido validado a partir de datos experimentales obteniendo una precisión mayor del 97,5 % respecto a las ganancias a través del acristalamiento, y superior al 95 % en lo que se refiere a las ganancias de energía del agua en circulación, por lo que constituye una aproximación razonable frente al modelo detallado.

Metodología y resultados preliminares de simulación

Only those who will risk going too far can possibly find out how far one can go.

Thomas S. Eliot

En este capítulo se desarrollan los diferentes procedimientos que se han llevado a cabo para simular el comportamiento del vidrio activo mediante TRNSYS. Esta simulación tiene dos vertientes, por un lado es necesario considerar la influencia del vidrio activo en el ambiente interior de los edificios, mientras que por otro, aunque directamente relacionado con el aspecto anterior, debe tenerse en cuenta la cantidad de energía solar que capta el agua cuando circula a través de la cámara.

Así, en primer lugar se analizan las simulaciones que han permitido caracterizar el módulo solar de referencia, bajo las condiciones ambientales del ensayo, a partir de los datos experimentales. A continuación se expone la metodología desarrollada para simular la influencia del vidrio activo en el ambiente interior del módulo solar. Finalmente se presentan los valores que toman los parámetros del Modelo Detallado, desarrollado en el Capítulo 5, para el caso del Taller Docente estudiado, lo que permite obtener la expresión matemática de la temperatura de salida que se implementará posteriormente en TRNSYS.

6.1. Software de simulación: TRNSYS

Las simulaciones llevadas a cabo a lo largo del presente trabajo se han realizado con el software simulación energética de edificios TRNSYS v17 [242]. TRNSYS (pronunciado 'tran-sis'), es un programa de simulación sistemas no estacionarios basado en una arquitectura modular. Fue desarrollado en 1976 en la Universidad de Wisconsin-Madison a partir de la tesis doctoral de Dr. Sanford Klein en el Departamento de Ingeniería Química. El programa reconoce la descripción del sistema mediante un lenguaje en el que el usuario define los componentes del sistema, denominados *Types*, y la forma en la que estos componentes están conectados entre sí.

TRNSYS se compone de dos partes. La primera de ellas, denominada kernel, es la encargada de leer y procesar los archivos de entrada, resolver el sistema mediante procedimientos iterativos, determinar la convergencia y dibujar las correspondientes gráficas [242]. Además el kernel proporciona utilidades que, entre otras cosas, determinan propiedades termofísicas, invierte matrices y lleva a cabo regresiones lineales e interpolaciones de datos contenidos en archivos externos. TRNSYS está especialmente diseñado para analizar sistemas cuyo comportamiento varía a lo largo del tiempo.

La segunda parte está formada una amplia librería de componentes, cada una de las cuales modela el comportamiento de una parte del sistema o *Type*. La librería estándar incluye 150 modelos como sistemas de bombeo, edificios con diferentes zonas térmicas, aerogeneradores, procesos electroquímicos, procesadores de tiempo atmosférico y cálculos económicos. Una de las principales ventajas que ofrece TRNSYS es que los modelos se construyen de tal forma que pueden ser modificados por el usuario, el cual puede incluso incluir nuevos elementos desarrollados a su medida, lo que multiplica las posibilidades de simulación.

Por otro lado, TRNSYS aparece en las regulaciones de la UE para sistemas solares (ENV 12977-2), y cumple las normas ASHRAE 140 y ASHRAE 90.1 relativas a la simulación energética de edificios, y sus diferentes versiones han sido validadas según diversas agencias internacionales (Tabla 6.1).

Tabla 6.1: Procedimientos y tareas de validación de TRNSYS. Fuente: Web TRNSYS [242].

TRNSYS version	Validation procedure	Task
13.1	<i>Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Methods.</i>	<i>Task 12 - Solar Heating and Cooling Program - International Energy Agency: Building Energy Analysis and Design Tools For Solar Applications.</i>
14.2	<i>IEA Building Simulation Test and Diagnostic Method for HVAC Equipment Models (HVAC BESTEST).</i> <i>Empirical validation of Iowa Energy Resource Station Building Energy Analysis Simulation Models</i>	<i>Task 22 – Solar Heating and Cooling Program – International Energy Agency: Building Energy Analysis and Design Tools For Solar Applications.</i>
16.1	<i>IEA Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method for Multi-zone Non Air-flow In-Depth Diagnostic Cases: MZ320-MZ360 (MULTIZONE BESTEST)</i> <i>Empirical Validation of Shading / Daylighting / Load Interactions in Building Energy Simulation Tools</i>	<i>Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools - Task 34 – Solar Heating and Cooling Program and Annex 34 - Energy Conservation in Buildings and Community Systems</i>

6.2. Elementos considerados en la simulación

En las diferentes simulaciones llevadas a cabo se han empleado los componentes indicados en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Elementos empleados en la simulación mediante TRNSYS

Función	Elemento en la simulación
Edificio	Type 56
Procesador Datos climáticos	Type 15
Vidrio activo	Ecuación
Depósito vidrio activo	Type 39
Bomba calor agua-aire	Type 919 (TESS)
Bomba calor aire-aire	Type 917 (TESS)
Bomba circuladora	Type 3d
Divisor de flujo	11
Concentrador flujo	11
Termostato	Type 108 (TESS)
Control humedad	Type 658 (TESS)
Horario acondicionamiento	Type 14
Controladores	Ecuaciones
Tubería	31
Intercambiador geotérmico	Type 997
Depósito almacenamiento	Type 60
Módulo fotovoltaico	Type 94

Además, para lograr la convergencia en las simulaciones se ha empleado el Type 93 - *Input value recall*, de manera que los valores de las variables aportadas al controlador estaban desfasadas tres pasos de tiempo o *timestep*.

6.3. Simulación del vidrio de referencia: resultados

Como paso previo a la simulación del vidrio activo, se hace necesario llevar a cabo la simulación de un vidrio estático de características conocidas que permita determinar ciertos parámetros de la simulación bajo las condiciones de ensayo reales. Para ello se ha tomado un día con condiciones de estables de radiación, esto es con ausencia total de nubosidad, que ha sido el 23 de mayo de 2013.

De esta forma se ha simulado el módulo solar equipada con el vidrio de referencia claro de 6 mm en el software de simulación TRNSYS v17 a partir de su modelo en 3D (Figura 6.1), comparándose más tarde los valores experimentales de temperatura interna del módulo con los obtenidos mediante simulación.

(a) Módulo solar

(b) Modelo tridimensional de la módulo

Figura 6.1: Módulo solar y su modelo en 3D. Fuente: Archivo propio

Al objeto de proporcionar los valores ambientales reales al programa de simulación, se ha hecho uso del archivo climático de Madrid en formato *EnergyPlus Weather Format (EPW)*, sustituyendo los valores de radiación solar de este archivo por los suministrados por la Agencia Española de Meteorología (AEMET) para los días simulados¹. Esto ha permitido calibrar los valores de algunas variables en el programa de simulación. Así, se ha identificado la reflectancia del suelo (ρ_g) o albedo, como una de las variables identificadas con mayor influencia en las temperaturas interiores de los módulos. Sin embargo su valor no ha podido ser determinado experimentalmente por carecer del equipo técnico necesario.

Con idea de determinar un valor aproximado para esta reflectancia se ha llevado a cabo la simulación del módulo de referencia empleando diferentes valores para ella, obteniendo un ajuste razonablemente bueno al emplear un valor $\rho_g = 0,45$, equivalente a la reflectancia de un suelo de arena fina, tal y como puede apreciarse en la Figura 6.2. Este valor podría considerarse inusualmente alto para el tipo de suelo empleado en la cubierta donde están situados los módulos de ensayo, al que por sus características correspondería un valor en torno a $\rho_g = 0,2$, similar al de una superficie de hormigón en condiciones de intemperie [251]. Sin embargo, ante la falta de un valor real de esta variable para el suelo en el que estaban situadas los módulos, y teniendo en cuenta los ajustes de las curvas de temperatura obtenidos mediante el software de simulación, podría suponerse que dicho valor es bastante cercano al valor efectivo de la reflectancia. Por otro lado, considerando la reducida distancia entre el vidrio y el suelo (15 cm), así como la elevada relación área suelo visible / área vidrio, podría conjeturarse que este valor tan elevado de reflectancia engloba, además de la propia

¹Estación meteorológica de Ciudad Universitaria (Madrid)

reflectancia real, el efecto de la temperatura del suelo sobre el acristalamiento, ya que no se dispone de valores experimentales para dicha temperatura.

De esta forma, empleando el citado valor $\rho_g = 0,45$, el ajuste es bueno en la mayor parte de la curva tal y como puede apreciarse en la Figura 6.2, con un error medio de $-0,58^\circ\text{C}$ (-2%) y un error máximo de $-2,18^\circ\text{C}$ (-9%) que se produce a partir de las 22:00 h cuando no existe radiación solar, lo que da lugar a una ligera sobreestimación la temperatura interior en el módulo por el programa.

Figura 6.2: Comparación entre diferentes valores de reflectancia

6.4. Simulación del vidrio con cámara de agua en circulación: resultados

Tal y como se ha explicado con anterioridad, para evaluar la influencia de un acristamiento activo en un determinado edificio es necesario integrar los modelos vistos en el Capítulo 5 en un software de simulación energética de edificios. No obstante, según se ha visto en el capítulo anterior esta integración no resulta sencilla, al no estar dichos programas diseñados para considerar el efecto de acristamientos que son capaces de parte de la energía que incide sobre ellos. Por tanto, para solventar este inconveniente se ha seguido la estrategia de sustituir el vidrio activo por un vidrio

equivalente que de lugar a unas condiciones térmicas similares en el edificio en el que está instalado. Esta parte de la metodología empleada es similar a la empleada por Pérez-Pujazón [85], en cuyo caso el vidrio activo con agua en circulación se sustituye asimismo a un vidrio de control solar al que se le añade una corriente de aire circulando por la cámara. De esta forma se obtienen valores de temperaturas interiores con errores menores al 5 % con respecto a los valores máximos y mínimos, mientras que en los tramos intermedios con mayor variación de temperatura el error cometido puede llegar a alcanzar el 15 %.

No obstante, en este caso el vidrio activo con agua en circulación se ha sustituido por un vidrio reflectante equivalente, y el procedimiento seguido se expone a continuación.

Una vez ajustados los parámetros necesarios para simular un vidrio sencillo, se ha procedido a determinar si existe un acristalamiento estático que pueda reproducir un comportamiento similar al mostrado por el acristalamiento activo con agua en circulación, en condiciones de radiación alta, media y baja (Tabla 6.3), manteniendo constante el resto de las variables calibradas mediante la simulación del módulo de referencia, incluida la reflectancia del suelo $\rho_g = 0,45$.

Día	Nivel Radiación	Irrad. global ² (W / m ²)
19 Mayo	Bajo	$RD < 300$
21 Mayo	Medio	$300 \leq RD \leq 600$
23 Mayo	Alto	$RD > 600$

Tabla 6.3: Criterios de clasificación de radiación

Tras evaluar diferentes tipos de vidrios, el mejor resultado para un día con nivel de radiación alta se ha obtenido empleando un vidrio 6/8/6 siendo el vidrio interior de 6 mm reflectante, con valores $U = 3 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $g = 0,26$ (Figura 6.3). Esto podría sugerir que el agua de la cámara no solo capta parte de la radiación incidente, sino que también elimina parte de los efectos térmicos que provienen del suelo en forma de radiación reflejada limitando el efecto de la temperatura del suelo antes comentado.

²Se ha tomado el valor máximo medido al mediodía solar por considerarse el más representativo a los efectos de captación en el ensayo.

En este caso el ajuste sigue siendo bueno, aunque no tanto como en el caso del vidrio de referencia. El error medio es de $-0,45^{\circ}\text{C}$ ($-1,56\%$) y el error máximo de $-1,16^{\circ}\text{C}$ ($-4,43\%$).

Figura 6.3: Comparación entre simulación y datos experimentales - Vidrio CAC - Radiación alta

La simulación para un nivel de radiación medio se ilustra en la Figura 6.4. En este caso se observa como simulación predice valores de temperatura interior más altos que los reales, especialmente en los que se refiere a los máximos. El error medio es de $-1,34^{\circ}\text{C}$ ($-5,17\%$), y el error máximo es de $-2,78^{\circ}\text{C}$ ($-9,68\%$).

Figura 6.4: Comparación entre simulación y datos experimentales - Vidrio CAC - Radiación media

Por último, la simulación correspondiente a un nivel de radiación bajo se muestra en la Figura 6.5. En este caso se aprecia como el programa de simulación da lugar a unas temperaturas mayores que las reales en prácticamente todo el intervalo de simulación. También puede verse como a partir de las 22:00 h entra en funcionamiento el sistema de control. En cuanto a los errores, el error medio en este caso es de $-1,45^{\circ}\text{C}$ ($-6,15\%$), y el error máximo de $3,56^{\circ}\text{C}$ ($-16,40\%$).

Figura 6.5: Comparación entre simulación y datos experimentales - Vidrio CAC- Radiación baja

En la Tabla 6.4 puede verse un resumen de los errores cometidos en las distintas simulaciones.

Día	Radiación	Vidrio	Variación media	Variación máxima
23 Mayo	Alta	Referencia	-0,58°C (-2 %)	-2,18°C (-9 %)
23 Mayo	Alta	CAC	-0,45°C (-1,56 %)	-1,16°C (-4,43 %)
21 Mayo	Media	CAC	-1,34°C (-5,17 %)	-2,78°C (-9,68 %)
19 Mayo	Baja	CAC	-1,45°C (-6,15 %)	3,56°C (-16,40 %)

Tabla 6.4: Variaciones de temperatura obtenidos en la simulaciones

Por otro lado, cuando el agua de la cámara se encuentra en reposo, el comportamiento del vidrio activo se asemeja al de un vidrio claro sencillo [85], debido a la alta conductividad térmica del agua y al hecho de que la energía absorbida por el agua, es de nuevo reemitida por el acristalamiento hasta que se alcanza un equilibrio con los ambientes interiores y exteriores. En la Tabla 6.5 se muestran los vidrios estáticos equivalentes a los diferentes estados del vidrio activo con agua en la cámara y sus propiedades promedio para el día seleccionado en la simulación (23 Mayo - Alta radiación).

Estado Vidrio Activo	Vidrio estático equiv.	U (W/m ² K)	g
Apagado	Claro 6 mm	5,7	0,66
Encendido	8 reflec. /6 (aire) /8 reflec.	3,0	0,21

Tabla 6.5: Vidrios equivalentes al vidrio activo obtenidos mediante simulación

Es necesario señalar que aunque la metodología aquí propuesta permite estimar de manera simplificada los parámetros térmicos U y g, no permite obtener otros parámetros característicos del acristalamiento tales como la reflectancia solar (ρ) y la transmitancia visible (τ_{vis}), ya que lo que se busca es una analogía entre los parámetros térmicos indicados. Este enfoque simplificado de la simulación de fachadas adaptativas es común cuando no se dispone de modelos detallados [252].

A modo de resumen, en la Figura 6.6 se muestra el un diagrama que ilustra el proceso completo que se ha seguido en la metodología de caracterización de las propiedades térmicas del vidrio activo.

Figura 6.6: Diagrama de flujo de la metodología de búsqueda de vidrios equivalentes

6.5. Conclusiones parciales en cuanto a la metodología de simulación

Actualmente no se ha identificado ningún software de simulación energética de edificios que permita simular acristalamientos activos con agua en circulación. Por lo tanto, para evaluar la influencia de este tipo de acristalamientos y su control en edificios a escala real mediante simulación, ha sido necesario desarrollar una metodología propia basada en el uso de valores experimentales.

Esta metodología se ha basado en la determinación de un vidrio pasivo con propiedades térmicas, U ($W/(m^2K)$) y g , equivalentes al vidrio activo, junto con la obtención de una expresión matemática que permite calcular la temperatura de la salida del agua que circula a través de la cámara a partir de otras variables conocidas. Dicha metodología ha permitido la simulación de los vidrios activos con cámara de agua en circulación mediante el software TRNSYS v17.

Mediante la citada metodología es posible, por tanto, emular el efecto que produce un acristalamiento activo con una cámara de agua en circulación sobre el ambiente interior de un determinado recinto a partir del uso de un vidrio pasivo equivalente.

Adicionalmente, a partir de la metodología propuesta es posible determinar también la temperatura del agua que circula a través de la cámara del acristalamiento activo empleando los modelos matemáticos expuestos. Esto constituye una primera aproximación a la simulación de este tipo de acristalamientos activos.

Resultados

In God we trust, all others bring data.

W. Edwards Deming

En este capítulo se presentan los resultados experimentales más significativos obtenidos a partir del montaje experimental descrito en el Capítulo 4. Dichos resultados consisten fundamentalmente en la comparación tanto de las temperaturas interiores como en las energías captadas y cedidas por el vidrio, así como los consumos eléctricos de calefacción de dos módulos solares equipados con diferentes vidrios.

Posteriormente, se exponen los resultados obtenidos para los diferentes escenarios simulados mediante el programa TRNSYS v17, junto con su evaluación económica.

7.1. Resultados experimentales

Los resultados obtenidos a partir del montaje experimental visto en la Sección 4.2.2 Descripción de la instalación experimental (Figura 7.1), han permitido evaluar el comportamiento de los vidrios activos frente a un vidrio de referencia mediante una comparación entre la respuesta térmica de ambos módulos. A pesar de que en este apartado solo se presentan los resultados de los ensayos más relevantes, el conjunto de los ensayos realizados se incluyen en el Anexo E.

Dentro de los resultados experimentales se expone en primer lugar, a modo de ejemplo, un ensayo que pone de relieve la necesidad de emplear un controlador para regular las condiciones de temperatura interior de los módulos solares. A continuación se presentan los resultados correspondientes obtenidos en condiciones de calefacción, seguidos de los que se refieren a las condiciones de demanda de calefacción.

Figura 7.1: Módulos solares de la instalación experimental. Fuente: Archivo propio

7.1.1. Justificación de la necesidad de control

Según lo expuesto en el Capítulo 3.- Estado del arte, el control de una fachada activa resulta esencial cuando se quieren controlar las condiciones del ambiente interior de un edificio. En el caso del

vidrio con cámara de agua en circulación esto queda ilustrado en la Figura 7.2, donde se representan las curvas de temperaturas del ensayo correspondiente al día 6 de febrero de 2013, en el que existe demanda de calefacción en los módulos experimentales ya descritos (Sección 4.2.2.a).

En dicha figura la temperatura del módulo de referencia viene dada por la línea de color azul y, la temperatura interior del módulo activo se representa por la línea de color rojo. Por otro lado, la temperatura del agua acumulada en el tanque se corresponde con la línea de color verde, y la temperatura ambiente se representa por la línea de color morado. Esta correspondencia entre colores y temperaturas se va a mantener a lo largo del presente capítulo.

De esta forma, puede apreciarse como a partir de aproximadamente las 19 h, la temperatura del módulo de referencia (línea de color azul) oscila en torno a la temperatura de consigna, en este caso 19°C, gracias al efecto del controlador que activa la resistencia eléctrica al entrar el módulo de referencia en Modo Calefacción según el algoritmo de el módulo de referencia (Figura 7.3). Por el contrario, en el módulo activo al no disponer de sistema de control, el agua sigue circulando a través de la cámara. Esto da lugar a que, aproximadamente a las 22:40 h, la temperatura del módulo activo (línea de color rojo) tienda a igualarse con la temperatura del agua que circula por la cámara a la temperatura del tanque (línea de color verde), al no haber activado el controlador su resistencia calefactora. Esta caída de temperatura en el módulo activo pone de relieve la necesidad de equipar al vidrio activo con un sistema de control que permita mantener la temperatura interna del módulo dentro de los límites de confort deseados.

Figura 7.2: Necesidad de control del vidrio activo

Figura 7.3: Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Calefacción - Módulo de referencia

7.1.2. Resultados experimentales en condiciones de demanda de calefacción

A continuación se presentan los resultados obtenidos para varios ensayos en condiciones de demanda de calefacción según diferentes niveles de radiación solar. De entre todos los ensayos realizados se exponen a continuación los correspondientes a los días 14, 16 y 17 de febrero de 2013, por considerarse días representativos de situaciones de irradiación solar consideradas como alta, media y baja respectivamente (Tabla 7.1). En estas condiciones, el sistema de control opera según el algoritmo de la Figura 7.4 y los valores de la Tabla 7.2. Dicho algoritmo está basado en medidas de la temperatura interior por ser las variables de control que proporcionan menores demandas de calefacción y refrigeración [253].

Tabla 7.1: Clasificación de niveles de radiación

Día	Nivel Irradiación	Rango (W/m ²)	Irrad. solar máxima (W/m ²)
14/02/2013	Alto	$600 < \text{Irrad.}$	622
16/02/2013	Medio	$300 \leq \text{Irrad.} \leq 600$	550
17/02/2013	Bajo	$\text{Irrad.} < 300$	275

Figura 7.4: Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Calefacción

Tabla 7.2: Temperaturas de consigna - Cond. demanda calefacción

Variable	Valor
$T_{con-inf}$	21°C
$T_{con-sup}$	23°C
$T_{alm-util}$	23°C
$T_{cam-util}$	$T_{Amb} + 2\text{ °C}$

7.1.2.a. Día con nivel elevado de radiación

El comportamiento térmico de los módulos solares en un día con nivel elevado de radiación solar, concretamente el 14 de febrero de 2013, se presenta en la Figura 7.5. En ella puede apreciarse como la curva de temperaturas en el módulo de referencia (línea de color azul), supera a la de temperaturas del módulo equipado con el vidrio activo (línea de color rojo), así como a la temperatura ambiente (línea de color violeta).

Las temperaturas máximas del módulo de referencia y del módulo activo son 72°C y 52°C respectivamente, mientras que el agua acumulada alcanza una temperatura máxima de 21°C. Si bien en un recinto habitable no se alcanzarían temperaturas interiores tan elevadas, la diferencia entre ambas permite observar el efecto de la circulación del agua sobre la reducción de temperatura del ambiente interior. Este efecto reductor de las cargas solares sobre el ambiente interior coincide con lo indicado por autores como Chow et al. [65, 87, 254], y permite que al mismo tiempo que el agua circulante se almacena en el tanque (línea de color verde, vea incrementada su temperatura por encima de la temperatura ambiente).

Por otro lado, el efecto del controlador sobre la temperatura interior de ambos módulos queda de relieve a partir de las 23 h, cuando este logra que la temperatura permanezca siempre dentro del rango de confort (21-23°C) mediante la activación del Modo Calefacción Solar; o de los Modos Calefacción Asistida / Calefacción Eléctrica, que suponen la puesta en marcha de las resistencias calefactoras.

Figura 7.5: Temperaturas - Radiación solar alta

Como ya se ha indicado, el controlador dispone de diferentes modos de funcionamiento entre los que elige el más conveniente en función de distintas temperaturas evaluadas. En la Figura 7.6 se observa como, en función de estos valores de temperaturas y el algoritmo de control programado (Figura 7.4), la instalación experimental opera en Modo Acumulación entre las 10:30 y las 22:00 h (recuadro rojo a trazos), y en Modo Calefacción Asistida entre las 23:00 y las 9:00 h del día siguiente (recuadro verde a trazos). Al no alcanzarse la Temperatura de Almacenamiento Útil ($T_{alm-util} = 23^{\circ}\text{C}$), en el tanque de acumulación el sistema no llega a entrar en el Modo Calefacción Solar.

Figura 7.6: Modos de funcionamiento - Radiación solar alta

Con idea de ilustrar la contribución neta de la radiación a la temperatura interior de los módulos y al agua acumulada en el tanque, se ha restado la temperatura ambiente a las temperaturas interiores de cada módulo. La gráfica resultante se expone en la Figura 7.7, donde puede verse como la acumulación durante el periodo de radiación solar, hace que la diferencia de temperatura entre la temperatura del agua acumulada en el tanque (T_{Tanque}) y la temperatura ambiente (T_{Amb}) sea de 12,8°C en el momento en el que comienza la demanda de calefacción, aproximadamente a las 22:30 h. En una instalación a escala real, este incremento de temperatura del agua acumulada sobre la temperatura ambiente podría aprovecharse mediante el empleo una bomba de calor agua-aire, lo que daría lugar a una mejora del rendimiento de la instalación.

Figura 7.7: Influencia radiación solar - Radiación solar alta

Los procesos de acumulación y cesión de energía mediante una variación de la temperatura del agua almacenada que corresponde a cada modo de funcionamiento se muestran en la Figura 7.8. El cálculo de esta energía acumulada (E_{acu}) o cedida (E_{ced}) en cada caso, se obtiene a partir de la variación de la temperatura del volumen de agua acumulada en el tanque para cada intervalo mediante la expresión

$$E = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT = m C_p \int_{T_i}^{T_f} dT = m C_p (T_f - T_i) \quad (7.1)$$

donde:

m , es la masa de agua acumulada, que este caso se corresponde con 99,7 kg considerando un volumen de 100 l y una densidad del agua $\rho = 0,997 \text{ Kg/m}^3$.

C_p , es el calor específico del agua, en este caso $4184 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$.

T_i , es la temperatura inicial del agua al comienzo del periodo evaluado ($^\circ\text{C}$).

T_f , es la temperatura final del agua al final del periodo evaluado ($^\circ\text{C}$).

En este ensayo concreto el controlador permitió acumular en torno a 921,9 Wh entre las 10:30 y las 22:00 h (línea de color rojo). A partir de esa hora, el sistema entra en Modo Apagado un corto espacio de tiempo, aproximadamente entre las 22:00 y las 23:00 h en el que la temperatura interior se encuentra dentro del límite de confort ($21\text{--}23^\circ\text{C}$). Una vez que la temperatura interior baja de 21°C se hace necesario activar la resistencia calefactora. En este caso, al existir en el tanque agua almacenada a una temperatura superior a la ambiente, el controlador selecciona el Modo Calefacción Asistida para el módulo activo, de manera que se activa la resistencia calefactora al mismo tiempo que se hace circular el agua acumulada a través de la cámara. El controlador mantiene activo el Modo Calefacción Asistida entre las 23:00 y las 9:30 h del día siguiente. A lo largo de este periodo el sistema va cediendo la energía acumulada (línea de color verde) durante las horas de radiación solar (línea amarilla a trazos).

Figura 7.8: Curvas de energía acumulada y cedida - Radiación solar alta

En este modo el agua cede 904,7 Wh. Sin embargo al ser la temperatura del agua que circula a través de la cámara menor que la temperatura interior del módulo, la transferencia de calor se produce desde el interior hacia el agua circulante. No obstante, debido a que la temperatura del agua que circula es mayor que la temperatura ambiente, en este caso se reducen las pérdidas desde interior hacia el ambiente exterior.

Además, al ser el gradiente de temperaturas entre el agua que circula en la cámara y el ambiente exterior mayor que el gradiente entre el agua circulante y el interior del módulo, la mayor parte de la energía acumulada en el agua se disipa hacia el exterior. Esto indica que aunque los vidrios activos con una sola cámara son eficaces para reducir las cargas solares y captar parte de la energía solar, no deben emplearse como sistemas de acondicionamiento.

Con respecto a la energía consumida (E_{con}), en la Figura 7.9, se muestran los consumos de ambos módulos solares calculados a partir de la expresión

$$E_{con} = \int_{t_i}^{t_f} P_{res} dt = P_{res} (t_f - t_i) \quad (7.2)$$

El consumo eléctrico de la resistencia calefactora del módulo de referencia viene dado por línea de color azul, mientras que el consumo de la resistencia del módulo equipado con el vidrio activo se representa por la línea de color rojo. De esta forma, en el presente caso el módulo de referencia ha tenido un consumo de 427,50 Wh, frente a los 390,75 Wh del módulo activo, así la diferencia de consumos entre ambos es de 36,75 Wh, es decir, se ha obtenido un ahorro de energía del 8,6 %. Sin embargo se ha aprovechado únicamente el 4,5 % de la energía captada. Obviamente, al tratarse de una instalación experimental no optimizada, esta cantidad podría incrementarse empleando un acristalamiento triple, o empleando el agua almacenada como agente calefactor de un sistema de alta eficiencia como una bomba de calor.

Figura 7.9: Curvas de consumo nocturno - Radiación solar alta

7.1.2.b. Día tipo con nivel medio de radiación solar

Se ha elegido el día 16 de febrero de 2013 como un día representativo de un nivel medio de radiación solar. En este caso, la menor irradiación solar da lugar a una disminución tanto en la temperaturas interiores de los módulos como en la del agua acumulada (Figura 7.10). Así, las temperaturas máximas del módulo de referencia y del módulo activo son 51°C y 37°C respectivamente, en tanto que el agua acumulada alcanza una temperatura máxima de 17,5°C.

Figura 7.10: Temperaturas - Radiación solar media

No obstante, este nivel de irradiación es suficiente para activar el Modo Acumulación (Figura 7.11), almacenando agua a una temperatura mayor que la temperatura ambiente, que posteriormente puede ser empleada mediante el Modo Calefacción Asistida (Figura 7.11). En este caso el Modo Calefacción asistida se activa sobre la 20:30 h, cuando el agua almacenada se encuentra 5,9°C por encima de la temperatura ambiente (Figura 7.12).

Figura 7.11: Modos de funcionamiento - Radiación solar media

Figura 7.12: Influencia radiación solar - Radiación solar media

En lo que respecta a las energías acumuladas y cedidas (Figura 7.13), el Modo Acumulación logra almacenar 760 Wh durante sus horas de funcionamiento entre las 11:00 h y las 19:22 h. Por otro lado, el tanque cede 802,7 Wh durante su funcionamiento en el Modo Calefacción asistida desde las 20:08 hasta las 8:16 h.

En relación con los consumos de cada módulo, se representa en la Figura 7.14. En este caso, el módulo de referencia ha consumido 470,7 Wh frente a los 441,0 Wh del módulo activo, lo que supone una reducción de consumo del 6,3% en el segundo.

Figura 7.13: Energía acumulada y cedida - Radiación solar media

Figura 7.14: Consumos - Radiación solar media

7.1.2.c. Día tipo con nivel bajo de radiación solar

En el caso del nivel de radiación solar bajo las temperaturas interiores en los módulos son mucho menores que en los casos anteriores, alcanzándose una temperatura máxima de 24°C en el módulo de referencia y de 22°C en el módulo activo (Figura 7.15). Esto da lugar a que el sistema nunca llega a

activar el Modo Acumulación (Figura 7.17), al no cumplirse la condición necesaria según el algoritmo de control (Figura 7.4), lo que hace que la temperatura máxima del agua acumulada sea de 11°C.

Figura 7.15: Temperaturas - Radiación solar baja

Así, el controlador continua en Modo Calefacción Asistida hasta las 12:00 h, debido a que existe agua acumulada del día anterior (Figura 7.17). Después, pasa a Modo Apagado hasta las 16:40 h, cuando se activa el Modo Calefacción. En este caso se activa el Modo Calefacción, que consiste en la activación de la resistencia eléctrica sin que circule agua a través de la cámara, en lugar del Modo Calefacción Asistida. Esto ocurre debido a que no existe agua almacenada que cumpla las condiciones indicadas en el algoritmo de control (Figura 7.4), por no haberse producido acumulación.

En cuanto a los consumos durante el periodo de calefacción, se obtienen unos valores de 404,9 Wh para el módulo de referencia y de 406,5 Wh para el módulo activo. Aunque ambos valores son similares, en la Figura 7.18 se aprecia como desde las 16:00 hasta las 22:00 h la pendiente de la línea de consumo del módulo activo es algo menor que el del módulo de referencia. Esto podría deberse a que, en ese intervalo, la mayor inercia térmica que posee el módulo activo al tener la cámara llena de agua suaviza la pendiente. Sin embargo, ese efecto desaparece a partir de las 22:00 h, cuando el agua habría cedido todo el calor sensible acumulado. A partir de esa hora la línea de consumo del módulo activo presenta una pendiente superior a la del módulo de referencia. Esto podría deberse a que, una vez que el agua ha cedido toda la energía acumulada, la inercia térmica del módulo activo resulta mayor que la del módulo de referencia. Este incremento en la inercia térmica hace que sea necesario aportar una mayor cantidad de energía para incrementar la temperatura del módulo activo que para incrementar la temperatura del módulo de referencia.

Figura 7.16: Modos de funcionamiento - Radiación solar baja

Figura 7.17: Influencia radiación solar - Radiación solar baja

Figura 7.18: Consumos - Radiación solar baja

7.1.3. Resultados experimentales en condiciones de demanda de refrigeración

En el caso de los ensayos experimentales en condiciones de demanda de refrigeración el agua acumulada no es útil para acondicionar el interior de los módulos, por lo que solo se da el efecto reductor sobre las cargas solares. No obstante, en un edificio real este agua podría emplearse como ACS precalentada, o para regenerar el terreno en contacto con un intercambiador geotérmico.

Tal y como se ha expuesto en el apartado 3.1.2.a.- Contribución energética de los acristalamientos activos con cámara de agua circulante, ya existen numerosos estudios a partir de datos experimentales acerca del comportamiento de los acristalamientos activos con agua en circulación en condiciones de demanda de refrigeración [64, 86, 254]. Al considerar que están suficientemente estudiados los vidrios activos dobles con cámara de agua, se ha optado por ensayar un acristalamiento triple con una configuración 44.1/12/44.1/8/6, donde la cámara de 12 mm está llena de agua, y la de 8 mm contiene aire.

En condiciones de refrigeración el controlador de la instalación experimental tiene implementado el algoritmo de la Figura 7.19, con los valores de consigna dados en la Tabla 7.3. Por otro lado, en esta serie de ensayos los módulos solares están orientados con su cara acristalada hacia el sur.

De acuerdo con el algoritmo de la Figura 7.19 y los valores de consignas dados en la Tabla

7.3, en esta serie de ensayos el controlador está orientado a poner en marcha la circulación de agua cuando se superara el valor establecido para la temperatura interior de consigna, de forma que el agua en circulación capte parte de la radiación solar, al mismo tiempo que extrae energía del interior del módulo. Debido a dicha extracción de energía del interior del módulo puede llegar a darse un rendimiento de captación hipotético superior al 100 %, tal y como indica Chow [87].

Figura 7.19: Diagrama de flujo del algoritmo básico en Modo Demanda de Refrigeración

Tabla 7.3: Temperaturas de consigna - Cond. demanda refrigeración

Variable	Valor
$T_{con-sup}$	25°C
$T_{max-ref}$	$T_{Amb} - 2^{\circ}\text{C}$

Una vez establecido el algoritmo de control y las condiciones de consigna asociadas, en la Figura 7.20 se exponen los resultados obtenidos para el día 31 de agosto de 2013, tomado como un día característico con nivel de radiación solar alta y elevada demanda de refrigeración. Dado que en condiciones de demanda de refrigeración las condiciones climáticas suelen ser más estables que en condiciones de demanda de calefacción, se ha considerado suficiente emplear un único caso de estudio.

Como puede verse en la figura indicada, la circulación del agua a través de la cámara da lugar a una variación de hasta 19°C en la temperatura interior de los módulos.

Al no disponerse de un equipo de refrigeración, en estas condiciones el ensayo se ha empleado para verificar las reducciones de cargas solares obtenidas mediante el vidrio activo, y para estudiar el efecto del enfriamiento nocturno gratuito sobre la temperatura del tanque de acumulación. Además, el sistema de control sería capaz de activar un equipo de refrigeración de accionamiento análogo al sistema de calefacción visto en el apartado anterior.

Como ventaja adicional, el agua contenida en la cámara este tipo de vidrios activos hace que se incremente la conductividad del acristalamiento en su conjunto, lo que, en caso de sobrecalentamiento, podría emplearse para llevar a cabo enfriamiento gratuito del interior del módulo durante las horas nocturnas en la que desciende la temperatura exterior [65]. Este enfriamiento gratuito sería independiente del enfriamiento nocturno del agua acumulada en el tanque que se ha llevado a cabo en esta serie de ensayos experimentales.

Los diferentes modos de funcionamiento que toma el sistema de control durante el ensayo se muestran en la Figura 7.21. Así, puede verse como el sistema entra en Modo Refrescamiento entre las 13:00 y las 17:00 h. En este modo el agua acumulada en el tanque se encuentra a una temperatura menor que la ambiente, por lo que su circulación a través de la cámara absorbe parte de la radiación solar al mismo tiempo que retira una parte de la energía del aire interior del módulo activo. Más tarde, entre las 17:00 y las 21:00 h el sistema pasa al Modo Disipación, debido a que la temperatura del agua acumulada supera el valor límite establecido, que este caso era de 2°C por debajo de la temperatura ambiente. En este modo de funcionamiento el agua que circula a través de la cámara se hace pasar a través de un radiador equipado con un electroventilador para disminuir su temperatura. Por último, entre las 21:00 y las 7:40 h, el sistema entra en Modo Enfriamiento Nocturno. El hecho de que el sistema entre en Modo Enfriamiento Nocturno, a pesar de que la temperatura interior del módulo activo se encuentre por encima de la temperatura de confort, se debe a que en la estrategia de control se optó por dar prioridad al enfriamiento del agua acumulada sobre el confort interior.

En un edificio habitado este modo de funcionamiento podría mantenerse si fuera posible reducir la temperatura interior, por ejemplo mediante la apertura de las ventanas. En caso contrario esta estrategia debería obviarse, de manera que el modo disipación debería permanecer activo hasta el la temperatura interior se encontrara por debajo de la temperatura de confort (Figura 7.22).

Figura 7.20: Temperaturas - Cond. demanda refrigeración

Figura 7.21: Control prioritario de la eficiencia energética - Cond. demanda refrigeración

Figura 7.22: Control prioritario del confort - Cond. demanda refrigeración

Con idea de discriminar entre las influencias de la radiación solar y de la temperatura ambiente sobre el interior de los módulos, se han obtenido las curvas de temperatura interior de cada módulo una vez deducida la temperatura ambiente (T_{Amb}), de forma que se ha eliminado el efecto de esta última. Una vez hecho esto, en la Figura 7.23 puede verse como durante las horas con radiación solar la influencia de la temperatura ambiente es prácticamente nula, al ser la diferencia máxima entre las temperaturas ($T_{Cref} - T_{amb}$ y $T_{Cvid} - T_{amb}$) de ambos módulos aproximadamente 20°C, similar a la diferencia máxima entre las temperaturas interiores ($T_{CRef} - T_{CVid}$). Por lo que puede deducirse que la diferencia de temperaturas es consecuencia directa de la radiación solar incidente.

Figura 7.23: Influencia de radiación solar - Cond. demanda refrigeración

En este caso, al no haberse activado el Modo Acumulación, no se ha almacenado agua disponible para activar el Modo Calefacción Asistida, por lo que, al contrario que en los dos casos anteriores, no tiene sentido incluir ninguna figura relativa a la acumulación o cesión de energía.

En cuanto a las energías captadas, en la Figura 7.24 se muestra la energía captada por el agua durante los periodos de Modo Refrescamiento (línea de color azul) y Modo Disipación (línea de color rojo), que tienen unos valores acumulados de 411,3 Wh y 401,75 Wh respectivamente. Como en este caso la temperatura ambiente es superior a la temperatura del agua acumulada, al contrario de lo que ocurre en condiciones de demanda de calefacción, para descartar las posibles transferencias térmicas entre el ambiente y dicha agua el cálculo de la energía se ha llevado a cabo considerando la diferencia de energías entre el aire interior del módulo de referencia y del módulo activo. Así, la energía captada por el agua durante el funcionamiento del sistema en Modo Disipación alcanza su máximo cuando la diferencia entre ambos módulos es máxima, esto es, en torno a las 20:00 h.

Por otro lado, en la Figura 7.25 se muestra la energía que el sistema cede durante el Modo Enfriamiento Nocturno, que tiene un valor acumulado de 1121 Wh a lo largo de todo el periodo de enfriamiento nocturno. Mediante este proceso de enfriamiento gratuito, el agua acumulada en el tanque se encuentra a una temperatura apta para que el controlador pueda activar el Modo Refrescamiento al día siguiente, cuando la temperatura interior del módulo activo supere el límite superior de confort.

Figura 7.24: Energía captada - Cond. demanda refrigeración

Figura 7.25: Energía disipada - Cond. demanda refrigeración

7.2. Resultados de simulación

Tal y como se ha comentado en la Sección 5.2 Modelos de los acristalamientos activos con agua en circulación, no se ha encontrado ningún software de simulación que permita la simulación directa de vidrios con agua en circulación, por lo que ha sido necesario implementar los modelos expuestos en dicha sección en TRNSYS, y emplear la metodología de simulación expuesta en la Sección 6 Metodología de simulación y resultados preliminares.

Una vez que se dispone de la metodología de simulación apta para simular un acristalamiento activo con cámara de agua circulante (Sección 6), y se ha caracterizado el comportamiento del vidrio dinámico (Sección 6.4), es posible determinar la contribución de un acristalamiento activo gobernado por un controlador a un edificio EECN mediante simulaciones en TRNSYS. En este caso, se ha escogido como edificio de estudio uno de los talleres docentes situado en la ETS de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid, concretamente el situado más al norte. Se trata de un edificio completamente exento, de construcción ligera, y con una superficie en planta de 39 m². Este taller posee diversas partes de su fachada acristaladas, está sobreelevado 0,5 metros desde el nivel del suelo, y se encuentra localizado en el aparcamiento de la citada Escuela (Figuras 7.26 y 7.27).

Figura 7.26: Taller Docente situado en la ETS Arquitectura. Fuente: Archivo propio

Figura 7.27: Planos del taller docente. Fuente: Pérez-Pujazón [85]

A continuación se detallan las condiciones de simulación que se han supuesto en TRNSYS, las demandas energéticas del taller analizado, y los consumos resultantes de cada una de las simulaciones realizadas, que se corresponden con los escenarios indicados en la Tabla 7.4.

Tabla 7.4: Vidrios empleados en cada escenario

Escenario	Sist. acond.	Vidrio S/E/O	Vidrio N
1	BC aire-aire	SGG Stadip Clear 44.1	SGG Stadip Clear 44.1
2	BC aire-aire	SGG Stadip Clear 44.1	SGG Stadip Clear 44.1
3-1	BC agua-aire	Claro 6/8/6	Claro 6/8/6
3-2	BC agua-aire	Control solar 6/8/6	Control solar 6/8/6
4-1	BC agua-aire	Vidrio activo sin control	Control solar 6/8/6
4-2	BC agua-aire	Vidrio activo automático	Control solar 6/8/6

7.2.1. Condiciones de simulación

Como paso previo a la simulación debe modelarse el taller en tres dimensiones (Figura 7.28) mediante SketchUp [255] de manera que pueda importarse su geometría de manera sencilla, y se consideren los elementos de sombra existentes. A continuación se introducen en TRNSYS tanto los cerramientos opacos como los acristalamientos con los que está equipado dicho taller actualmente. La composición de los cerramientos opacos y las propiedades físicas de los elementos que los forman se muestran en la Tabla 7.5. Por otro lado, en la Tabla 7.6 se incluyen tanto los espesores como las transmitancias térmicas¹ de estos cerramientos. Las propiedades de los vidrios se reflejan en la Tabla 7.7, mientras que en la Tabla 7.8 se indican las superficies acristaladas, la relación entre dichas superficies y la de los cerramientos opacos en los que se encuentran (*Window to Wall Ratio* o WWR), así como su relación con el área en planta del edificio (*Window to Floor Area* o WFA). En cuanto a los marcos, se ha considerado una $U = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$ correspondiente a un marco de aluminio con rotura de puente térmico según UNE-EN ISO 10077-1:2010 [256], representando un 12 % de la superficie de los vidrios.

En los distintos escenarios simulados se han considerado unas infiltraciones equivalentes a 0,27 l/h, que se corresponden con la permeabilidad al aire de las carpinterías de ventanas no practicables de acuerdo con la norma UNE-EN 12207:2000 Ventanas y puertas. Permeabilidad al aire. Clasificación [257]; y una capacitancia de 500 kJ/K para tener en cuenta el efecto del mobiliario sobre la inercia térmica. Por otro lado, las condiciones de confort que debe mantener el taller son las indicadas en la Tabla 7.9. No obstante, el control de estas variables únicamente se realiza durante el horario de apertura de la ETS de Arquitectura, es decir, en horario de 8 a 22 h. Durante este periodo se han supuesto unas cargas internas de 2 personas sentadas trabajando, según ISO 7730 [258], y un equipo informático (230 W). A pesar de ser un centro docente, las simulaciones se han llevado a cabo considerando su uso durante los 365 días del año, incluyendo tanto el mes de agosto como otros periodos no lectivos. Por otro lado, el paso de tiempo empleado en todas las simulaciones ha sido de un minuto, de manera que este es el tiempo en el que se evalúan las diferentes variables por parte del programa de simulación.

¹Datos tomados de la base de datos de materiales de TRNSYS v17

Figura 7.28: Modelo 3D del edificio del taller docente. Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.5: Composición y propiedades de los cerramientos del taller docente

Cerramiento	Material	Espesor (m)	k (W/m K)	Cp (Wh/Kg K)	ρ (kg/m ³)	Resistividad (m ² K/W)
Fachada	Chapa aluminio	0,004	160	$2,5 \cdot 10^{-4}$	2800	
	Esp. Poliuretano	0,04	0,026	0,5	45	
	Chapa aluminio	0,004	160	$2,5 \cdot 10^{-4}$	2800	
Suelo	Lámina PVC	0,004	0,17	0,25	1390	
	Panel fibras	0,019	0,1189	0,472	650	
Cubierta	Chapa aluminio	0,004	160	$2,5 \cdot 10^{-4}$	2800	
	Cámara aire	0,1				0,18
	Lana vidrio	0,08	0,026	0,5	45	
	Chapa aluminio	0,004	160	$2,5 \cdot 10^{-4}$	2800	

Tabla 7.6: Características de los cerramientos del taller docente

Cerramiento	Espesor (m)	U (W/m ² K)
Suelo	0,023	2,94
Fachada	0,048	0,59
Techo	0,103	0,43

Tabla 7.7: Características de los acristalamientos del taller docente

Vidrio	U (W/m ² K)	g
SGG Stadip Clear 44.1	5,42	0,75

Tabla 7.8: Superficies acristaladas y relaciones de acristalamiento del taller docente

Orientación	Sup. acristalamiento (m ²)	Sup. Muro (m ²)	WWR	WFA	Rel. sup. acris./ sup. total
N	5,53	26,24	21,1 %	14,2 %	18,3 %
S	11,06	26,24	42,1 %	28,4 %	36,7 %
E	9,12	10,8	84,4 %	23,4 %	30,2 %
O	4,46	10,8	41,3 %	11,4 %	14,8 %

Tabla 7.9: Condiciones interiores de consigna

Condiciones	Temperatura (°C)	Humedad rel. máx. (%)
Calefacción	21	40-60
Refrigeración	26	

7.2.2. Demandas energéticas del taller

El primer paso en el análisis de la contribución de los vidrios activos ha consistido en determinar las demandas energéticas del taller docente en su situación actual. Así, las demandas de energía mensuales y anuales se presentan las Tablas 7.10 y 7.11 respectivamente, representándose ambas en la Figura 7.29. En ella se observa como la demanda máxima de calefacción es de 1177,9 kWh y se da en el mes de diciembre, seguida por la obtenida para el mes de enero con 1109,4 kWh. En cuanto a la demanda máxima de refrigeración resulta ser de 1082,3 kWh, y se da en el mes de Julio.

Tabla 7.10: Demandas mensuales del taller docente

Mes	Calefacción (kWh)	Refrigeración (kWh)
Enero	1109,4	22,4
Febrero	762,7	47,2
Marzo	466,7	172,2
Abril	317,8	176,4
Mayo	98,4	434,2
Junio	27,9	649,0
Julio	3,8	1082,3
Agosto	14,9	972,4
Septiembre	74,5	478,8
Octubre	313,4	226,4
Noviembre	675,1	55,4
Diciembre	1177,9	0,8

Considerando una superficie del taller de 39 m², se obtiene una demanda superficial de calefacción de 129,3 kWh/(año m²), una demanda superficial de refrigeración de 110,71 kWh/(año m²), y una demanda superficial total de 240,0 kWh/(año m²) (Tabla 7.11).

Tabla 7.11: Demandas anuales Taller

Demanda Taller	Calefacción	Refrigeración	Total
Total (kWh/año)	5042,7	4317,7	9360,4
Superficial (kWh/(año m ²))	129,3	110,71	240,0

Figura 7.29: Demandas de energía del Taller docente

7.2.3. Consumos del Taller docente

Una vez calculadas las demandas del taller docente, se van a determinar los consumos del taller equipado con los diferentes vidrios y sistemas de acondicionamiento expuestos en la Tabla 7.12.

Tabla 7.12: Vidrios empleados en cada escenario

Escenario	Sist. acond.	Vidrio S/E/O	Vidrio N
1	BC aire-aire	SGG Stadip Clear 44.1	SGG Stadip Clear 44.1
2	BC aire-aire	SGG Stadip Clear 44.1	SGG Stadip Clear 44.1
3-1	BC agua-aire	Claro 6/8/6	Claro 6/8/6
3-2	BC agua-aire	Control solar 6/8/6	Control solar 6/8/6
4-1	BC agua-aire	Vidrio activo sin control	Control solar 6/8/6
4-2	BC agua-aire	Vidrio activo automático	Control solar 6/8/6

7.2.3.a. Escenario 1: Taller equipado con bomba de calor aire-aire y vidrio claro sin cámara

Este escenario se corresponde con la situación actual del taller, en la que cuenta con unidades de vidrio laminares SGG Stadip Clear 44.1 de 8 mm de Saint Gobain. Por tanto, constituye la principal referencia con la que se van a comparar el resto de escenarios planteados, y representa el estado actual del taller docente. El acondicionamiento térmico se lleva a cabo mediante dos bombas de calor aire-aire, modelo Daitsu DS18U-P, que presentan un *Coefficient of Performance* (COP) de 3,61 y un *Energy Efficiency Ratio* (EER) de 3,21. Al no ofrecer el fabricante datos de rendimiento detallados en función de las condiciones del aire exterior no ha sido posible emplear estos equipos en el modelo simulado. Por tanto, se ha optado por emplear equipos comerciales que dispusieran de estos datos, con potencias y rendimientos similares (Tabla 7.14). Concretamente se han empleado dos unidades del modelo Mitsubishi MUZ GE50VA2 VAD (Figura 7.31) cuya potencia es similar a la de las unidades instaladas, y cuyos datos de rendimiento detallados se han suministrado al elemento que representa la bomba de calor en el modelo (Type 954a, desarrollado por la empresa *Thermal Energy System Specialists* - TESS). Sus características principales se detallan en la Tabla 7.14, y sus valores de funcionamiento según las condiciones ambientales pueden consultarse en el Anexo F.

Durante las simulaciones se han empleado sistemas de control de acondicionamiento de temperatura y humedad, destinados a mantener las condiciones de consigna de temperatura y humedad relativa dentro de los límites indicados por el Real Decreto 1826/2009, de 27 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE - RD 1027/2007) [217], mostrados en la Tabla 7.9. Así, el control de temperatura se lleva a cabo mediante un termostato (Type 108) que activa la calefacción o la refrigeración según las temperaturas interiores en cada instante y las indicadas en la Tabla 7.9. En cuanto al control de la humedad, se lleva a cabo a partir de un controlador específico (Type 658 - TESS). El esquema de la simulación correspondiente al Escenario 1 viene dado por la Figura 7.30. Por otro lado, en la Figura 7.32 puede verse un ejemplo del efecto del controlador sobre la temperatura interior. En dicha figura la línea de color rojo representa

la temperatura interior y la línea de color celeste la temperatura ambiente. Además, como puede observarse el controlador únicamente actúa en el periodo comprendido entre las 8:00 y las 22:00 h.

Tabla 7.13: Características de la bomba de calor aire-aire instalada en el Taller

Equipo	Daitsu DS18U-P
Sistema	Bomba calor aire-aire
Potencia nom. calefacción	5,86 kW
Potencia nom. refrigeración	5,57 kW
COP	3,61
EER	3,22

Tabla 7.14: Características de la bomba de calor aire-aire simulada

Equipo	Mitsubishi MSZ-GE 50 VAD
Sistema	Bomba calor aire-aire
Potencia nom. calefacción	5,8 kW
Potencia nom. refrigeración	4,8 kW
COP	3,61
EER	3,34

Figura 7.30: Esquema de la simulación del taller docente - Escenario 1

Figura 7.31: Bomba de calor aire-aire empleada en el Escenario 1

Figura 7.32: Control de temperatura del taller - Escenario 1

Adicionalmente, en la Tabla se indican las emisiones de CO₂ asociadas a los consumos obtenidos. Se ha empleado el coeficiente de paso para electricidad convencional nacional, que tiene un valor de 0,357 kg CO₂/kWh de energía final según lo indicado en el Documento Reconocido del Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) para el año 2016 [259].

Tabla 7.15: Consumos mensuales - Escenario 1

Mes	Calefacción (kWh)	Refrigeración (kWh)	Ventilación (kWh)	Total (kWh)
Enero	502,2	0,0	45,7	547,9
Febrero	347,6	1,1	47,9	396,6
Marzo	238,9	30,2	59,9	329,0
Abril	192,1	49,7	57,0	298,7
Mayo	29,5	163,9	37,1	230,4
Junio	12,4	323,3	22,0	357,6
Julio	4,3	686,7	7,0	698,1
Agosto	6,9	595,5	7,4	609,7
Septiembre	17,8	223,2	13,2	254,1
Octubre	122,2	62,8	49,1	234,1
Noviembre	291,9	6,7	48,2	346,9
Diciembre	570,1	0,0	44,6	614,7

Figura 7.33: Consumos del Taller docente - Escenario 1

Tabla 7.16: Consumos anuales Taller - Escenario 1

Consumos	Calefacción	Refrigeración	Ventilación	Total
Total (kWh/año)	2335,9	2143,1	439,0	4917,9
Superficial (kWh/(año m²))	59,9	55,0	11,3	126,2

Tabla 7.17: Emisiones dióxido carbono - Escenario 1

Emisiones CO ₂	
Totales (kg CO ₂ /año)	833,91
Por unidad de superficie (kg CO ₂ /(año m²))	21,38

7.2.3.b. Escenario 2: Taller equipado con bomba de calor aire-agua alimentada mediante geotermia y vidrio sin cámara

El Escenario 2 plantea la simulación del taller equipado con los mismos vidrios SGG Stadip Clear 44.1 empleados en el Escenario 1. Sin embargo, en este escenario el taller se encuentra equipado con una bomba de calor agua-aire alimentada mediante un intercambiador geotérmico horizontal

que se instalaría en la zona destinada al aparcamiento en la ETS de Arquitectura. De esta forma se busca identificar los ahorros energéticos debidos al empleo de este tipo de bomba de calor frente a la bomba de calor aire-aire con la que estaba equipada el taller en el Escenario 1 (Figura 7.30). En este escenario se ha empleado una unidad Trane modelo GEH035 (Figura 7.34), cuya potencia² es similar a la suma de las dos unidades de acondicionamiento aire-aire instaladas actualmente en el taller. Las características principales de esta bomba de calor agua-aire pueden verse en la Tabla 7.18.

Sus datos de rendimiento en función de la temperatura del agua y aire alimentados (véase Anexo G), se han introducido en los archivos a partir de los que opera la bomba de calor en TRNSYS (Type 919 TESS). Por otro lado, las características del intercambiador geotérmico horizontal empleado (Type 952 TESS), se detallan en la Tabla 7.19.

Figura 7.34: Bomba de calor agua-aire empleada en la simulación del Taller docente. Fuente: Trane [260]

Tabla 7.18: Características de la bomba de calor agua-aire (según Norma ARI/ISO 13256-2)

Equipo	Trane GEH035
Sistema	Bomba calor agua-aire
Pot. nominal calefacción	13,01 kW
COP	4,8
Pot. nominal refrigeración	10,32 kW
EER	4,6
Caudal nominal agua (l/min)	31,80
Caudal nominal aire (m ³ /h)	1937
Refrigerante	R-410A

²Al tener un mejor rendimiento, los resultados de las simulaciones mostraron que era posible reducir la potencia nominal de calefacción en un 50 % y de refrigeración en un 25 %.

Tabla 7.19: Características principales del intercambiador geotérmico

Parámetro	Valor
Configuración	Horizontal
Profundidad tuberías (m)	5
Longitud de la tubería (m)	400
Diámetro interno tubería (m)	0,0274
Diámetro externo tubería (m)	0,0334
Distancia entre tuberías (m)	1
Conductividad térmica tuberías (W/m K)	0,42
Densidad suelo (kg/m ³)	2500
Conductividad térmica del suelo (W/m K)	2,42

En esta ocasión la simulación se ha llevado a cabo según el esquema de la Figura 7.36. En ella las líneas de color verde representan el flujo de aire entre el taller y la bomba de calor, y las de color azul el flujo de agua entre el intercambiador geotérmico y la bomba de calor. El resto de líneas a trazos entre los diferentes elementos se refieren a señales de datos y control. En dicha figura pueden observarse, además, los sistemas empleados para mantener las condiciones interiores del taller dentro de los límites de control exigidas por el RITE (Tabla 7.9). Al igual que en el escenario anterior, el control de temperatura se lleva a cabo mediante un termostato (Type 108 TESS) que envía la señal al controlador que determina el modo de funcionamiento entre las opciones disponibles: Calefacción, Refrigeración o Apagado. Por otro lado, con objeto de mantener las condiciones interiores de humedad exigidas, se ha empleado también un controlador de humedad (Type 658 TESS) que mantiene su valor entre el 40-60 % mediante la activación de la ventilación de manera independiente a la climatización. Los resultados de los consumos mensuales y el consumo anual acumulado se presentan en la Tabla 7.20, y quedan representados en la Figura 7.35.

Tabla 7.20: Consumos mensuales del Taller docente - Escenario 2

Mes	Calefacción (kWh)	Refrigeración (kWh)	Ventilación (kWh)	Bombeo (kWh)	Total (kWh)
Mes	Calefacción	Refrigeración	Ventilación	Bombeo	Total
Enero	188,99	3,77	107,04	17,85	317,65
Febrero	124,59	8,78	107,96	11,95	253,29
Marzo	82,90	34,83	128,37	10,60	256,70
Abril	60,72	40,06	128,67	8,93	238,38
Mayo	15,62	114,46	128,31	10,62	269,00
Junio	6,00	171,47	111,78	13,96	303,22
Julio	2,27	277,32	93,19	21,07	393,85
Agosto	4,04	246,87	99,83	19,10	369,84
Septiembre	10,50	122,95	122,99	10,63	267,06
Octubre	47,54	57,56	133,07	9,20	247,36
Noviembre	108,15	12,79	121,96	10,93	253,83
Diciembre	216,18	0,26	99,96	19,06	335,45

Los consumos superficiales correspondientes a este escenario son de 22,2 kWh/(año m²) en calefacción, 28,0 kWh/(año m²) en refrigeración, y 89,9 kWh/(año m²) totales (Tabla 7.21). Por otro lado, las emisiones de CO₂ correspondientes a este escenario se indican en la Tabla 7.22.

Tabla 7.21: Consumos anuales Taller - Escenario 2

Consumos Taller	Calefacción	Refrigeración	Ventilación	Bombeo	Total
Total (kWh/año)	864,4	1159,9	1311,8	100,9	3406,9
Superficial (kWh/(año m ²))	22,2	28,0	35,5	4,2	89,9

Tabla 7.22: Emisiones dióxido carbono - Escenario 2

Emisiones CO ₂	
Totales (kg CO ₂ /año)	308,59
Por unidad de superficie (kg CO ₂ /(año m ²))	7,91

Figura 7.35: Consumos del Taller docente - Escenario 2

7.2.3.c. Escenario 3-1: Taller equipado con bomba de calor agua-aire alimentada mediante geotermia y vidrio claro con cámara

En este escenario los vidrios laminados Stadip Clear 44.1 se han sustituido por unidades aislantes con cámara de aire en una configuración 6/8/6 (Tabla 7.23), pero manteniendo el sistema de acondicionamiento basado en la bomba de calor geotérmica agua-aire, de forma que pueda cuantificarse el ahorro que se produce al emplear este tipo de acristalamientos.

El esquema de simulación es idéntico al del Escenario 2 (Figura 7.36). Los consumos mensuales y anuales se presentan en las Tablas 7.24 y 7.25 respectivamente. Estos consumos están representados en la Figura 7.37, mientras que las emisiones de CO₂ se muestran en la Tabla 7.26.

Tabla 7.23: Características de los acristalamientos del taller docente - Escenario 2-2

Tipo Vidrio	Configuración	U (W/m ² K)	g
Claro	6/8/6	3,21	0,72

Tabla 7.24: Consumos mensuales del taller docente - Escenario 3-1

Mes	Calefacción (kWh)	Refrigeración (kWh)	Ventilación (kWh)	Bombeo (kWh)	Total (kWh)
Enero	152,38	5,84	117,06	14,86	290,15
Febrero	101,12	13,08	113,43	10,32	237,96
Marzo	67,42	43,76	130,47	9,97	251,62
Abril	46,28	47,61	130,87	8,28	233,05
Mayo	12,86	121,69	127,39	10,89	272,83
Junio	5,10	176,23	110,91	14,22	306,46
Julio	1,96	272,55	94,32	20,74	389,56
Agosto	3,47	243,26	100,82	18,80	366,34
Septiembre	8,85	127,19	122,42	10,79	269,25
Octubre	39,47	64,36	133,78	8,99	246,60
Noviembre	88,84	17,08	126,52	9,57	242,02
Diciembre	180,80	1,03	102,98	16,09	300,90

Figura 7.36: Esquema de la simulación - Escenario 2

Tabla 7.25: Consumos anuales taller docente - Escenario 3-1

Consumo	Calefacción	Refrigeración	Ventilación	Bombeo	Total
Total (kWh/año)	708,6	1133,7	1411,0	153,5	3406,7
Superficial (kWh/(año m ²))	18,2	29,1	36,2	3,9	87,4

Tabla 7.26: Emisiones dióxido carbono - Escenario 3-1

Emisiones CO ₂	
Totales (kg CO ₂ /año)	252,97
Por unidad de superficie (kg CO ₂ /(año m ²))	6,49

Figura 7.37: Consumos del Taller docente - Escenario 3-1

7.2.3.d. Escenario 3-2: Taller equipado con bomba de calor agua-aire alimentada mediante geotermia y vidrio de control solar con cámara

En este nuevo escenario se considera que el edificio del taller está dotado en los acristalamientos de todas las orientaciones con vidrios estáticos de control solar con una configuración 6/8/6. Sus

características principales³ se presentan en la Tabla 7.27. Respecto al sistema de acondicionamiento, se ha empleando el equipo de bomba de calor agua-aire ya indicado. Por otro lado, su esquema de simulación es idéntico al de los escenarios 2 y 3-1 (Figura 7.36).

Tabla 7.27: Características de los acristalamientos del taller docente - Escenario 3-2

Tipo Vidrio	Configuración	U (W/m ² K)	g
Control solar	6/8/6	2,72	0,41

Los consumos mensuales para este escenario se presentan en la Tabla 7.28, y quedan ilustrados en la Figura 7.38.

Tabla 7.28: Consumos mensuales del taller docente - Escenario 3-2

Mes	Calefacción (kWh)	Refrigeración (kWh)	Ventilación (kWh)	Bombeo (kWh)	Total (kWh)
Mes	Calefacción	Refrigeración	Ventilación	Bombeo	Total
Enero	169,01	0,71	113,69	15,87	299,28
Febrero	113,94	2,72	112,99	10,45	240,10
Marzo	78,76	18,53	134,32	8,83	240,43
Abril	57,49	26,01	133,64	7,45	224,59
Mayo	16,17	82,19	136,47	8,19	243,01
Junio	6,56	130,97	121,71	11,01	270,24
Julio	2,59	217,08	107,35	16,86	343,87
Agosto	4,25	187,90	113,96	14,89	321,00
Septiembre	10,18	86,38	132,32	7,85	236,72
Octubre	43,36	34,39	140,73	6,92	225,39
Noviembre	99,99	5,32	126,79	9,49	241,60
Diciembre	193,54	0,00	106,64	17,07	317,25

³Pueden verse las características detalladas en el Anexo D

Los consumos anuales superficiales obtenidos en este caso para calefacción, refrigeración y totales son 20,0 kWh/(año m²), 21,0 kWh/(año m²) y 62,6 kWh/(año m²), y se presentan en la Tabla 7.29. Las emisiones de CO₂ correspondientes a este escenario se indican en la Tabla 7.30.

Tabla 7.29: Consumos anuales del taller docente- Escenario 3-2

Consumo	Calefacción	Refrigeración	Ventilación	Bombeo	Total
Total (kWh/año)	795,8	792,2	1480,6	134,9	3203,5
Superficial (kWh/(año m²))	20,4	20,3	38,0	3,5	82,1

Tabla 7.30: Emisiones dióxido carbono - Escenario 3-2

Emisiones CO ₂	
Totales (kg CO ₂ /año)	284,10
Por unidad de superficie (kg CO ₂ /(año m²))	7,28

Figura 7.38: Consumos del taller docente - Escenario 3-2

7.2.3.e. Escenario 4-1: Taller equipado con bomba de calor agua-aire alimentada mediante geotermia y vidrio con cámara de agua en funcionamiento continuo asociado al sistema de acondicionamiento

Tal y como se ha explicado con anterioridad, el vidrio activo desempeña una doble función de manera simultánea. Por un lado reduce las cargas solares que alcanzan el interior del edificio, mientras que por otro actúa como un colector solar, al ser capaz de generar una cierta cantidad de agua a temperatura superior a la ambiente.

En la simulación del vidrio activo, el efecto reductor de las cargas solares se ha logrado a partir de la identificación de un vidrio estático equivalente expuesta en la Sección 6.4 Simulación del vidrio con cámara de agua en circulación. Por lo tanto, a partir del empleo de este vidrio equivalente sería posible simular su influencia sobre el ambiente interior de una determinada estancia. Así, una vez caracterizados los estados del vidrio dinámico con agua en circulación mediante distintos vidrios estáticos, la evaluación del comportamiento de un sistema equipado con un vidrio de este tipo requiere alternar entre uno y otro vidrio dentro de una misma simulación. Para ello, en primer lugar ha de definirse el identificador (ID) de cada uno de los vidrios como una variable de entrada o *Input* en TRNSYS. Posteriormente, mediante un elemento de control del programa de simulación (*Equation*), se llevará a cabo la selección entre uno u otro emulando la activación de la circulación del agua (Figura 7.39), en función de la temperatura interior del módulo, al igual que ocurre en la instalación experimental. En la Figura 7.40 puede verse como cambian los valores de los parámetros U (línea de color azul) y g (línea de color rosa) a lo largo del periodo activo del controlador (línea de color naranja).

Figura 7.39: Activación del vidrio activo mediante el controlador

Figura 7.40: Variación de U y g mediante activación del vidrio activo

Por otro lado, para considerar el papel de colector solar del vidrio activo se ha tomado como aproximación el modelo ya descrito en la Sección 5.2.2 Modelo Simplificado particularizado para la unidad de vidrio activo empleada, compuesta por dos vidrios SGG Stadip Clear 44.1 separados por una cámara de agua de 12 mm. Según este modelo la temperatura del agua que sale de la cámara viene dada por la ecuación 7.3. Esta expresión se ha implementado en una *Equation* de TRNSYS, resolviéndose dinámicamente para cada paso de tiempo según el valor que tomen el resto de variables.

$$\theta_w = \theta_{in} - \left(\frac{q_3 - q_2 - A_w i_o}{\dot{m}c} \right) \quad (7.3)$$

Según el modelo descrito en la Sección 5.2.2 Modelo simplificado, como paso previo al cálculo de la temperatura (θ_w) es necesario determinar los valores de las absorbancias de las capas que componen el acristalamiento. En este caso se trata de la absorbancia para el vidrio externo (A_1), de la cámara de agua (A_w) y el vidrio interno (A_2). Estos valores⁴, mostrados en la Tabla 7.31, se han obtenido a partir del programa Window v7.4 [245] creando un acristalamiento formado por los dos vidrios SGG Stadip Clear 44.1 (ID 21492 - IGDB⁵ v53.0), y sustituyendo la cámara de agua por un vidrio monolítico claro de 2,2 mm de espesor nominal (ID 411 - IGDB v53.0), a partir de la equivalencia indicada por Chow y Li [88].

La implementación del modelo en TRNSYS permite la utilización del agua calentada por el vidrio para alimentar una bomba de calor aire-agua, de manera que el salto térmico del fluido que alimenta

⁴Para una incidencia normal al acristalamiento

⁵*International Glazing Database* [261]

la bomba de calor se ve disminuido, mejorando así su eficiencia. Además, en un edificio real, este agua también podría emplearse para el precalentamiento de ACS o la regeneración térmica del terreno en contacto con el intercambiador geotérmico, en caso de que no existiera demanda de calefacción.

Tabla 7.31: Absorbancias para las capas del acristalamiento activo

Capa	Parámetro	Valor
Vidrio externo	A_1	0,194
Cámara de agua	A_w	0,049
Vidrio interno	A_2	0,096

Los modos de funcionamiento disponibles en este escenario se indican en la Tabla 7.32, y serán seleccionados de acuerdo con el algoritmo de funcionamiento del Escenario 4-1 mostrado en la Figura 7.41. Este algoritmo se ha implementado en el elemento Control Modo de TRNSYS mediante una serie de ecuaciones que se detallan en el Anexo H.

Tabla 7.32: Modos de funcionamiento disponibles - Escenario 4-1

Modo	Condiciones
Calefacción	$T_{int} < T_{comfort-inf}$
Refrigeración	$T_{int} > T_{comfort-sup}$
Apagado	$T_{comfort-inf} \leq T_{int} \leq T_{comfort-sup}$

Como puede verse en dicho algoritmo los modos de funcionamiento disponibles son Modo Calefacción, Modo Refrigeración y Modo Apagado, sin que en este caso exista el Modo Acumulación. La circulación del fluido durante estos modos de funcionamiento se describe en el esquema de la Figura 7.43. Así, cuando se activa el Modo Calefacción o el Modo Refrigeración, el agua que proviene del intercambiador geotérmico circula de manera continua entre el vidrio y la bomba de calor. La relación entre el volumen de agua almacenada en el Tanque Sal. Vidrio, y la superficie de captación empleada en este escenario ha sido de 200 l/m².

Los consumos anuales de este escenario 4-1 calculados se reflejan en la Tabla 7.33. Dichos consumos se obtienen a partir de los consumos mensuales de la Tabla 7.35. Adicionalmente, las emisiones anuales de CO₂ se exponen en la Tabla 7.34.

Figura 7.41: Diagrama de flujo del algoritmo del sistema de control - Escenario 4-1

Tabla 7.33: Consumos anuales del taller docente - Escenario 4-1

Consumo	Calefacción	Refrigeración	Ventilación	Bombeo	Total
Total (kWh/año)	863,5	1293,3	693,8	317,1	3167,7
Superficial (kWh/(año m ²))	22,1	33,2	17,8	8,1	81,2

Tabla 7.34: Emisiones dióxido carbono - Escenario 4-1

Emisiones CO ₂	
Totales (kg CO ₂ /año)	308,26
Por unidad de superficie (kg CO ₂ /(año m ²))	7,90

Tabla 7.35: Consumos mensuales del taller docente - Escenario 4-1

Mes	Calefacción (kWh)	Refrigeración (kWh)	Ventilación (kWh)	Bombeo (kWh)	Total (kWh)
Enero	183,65	7,07	89,51	32,49	312,72
Febrero	120,95	14,95	94,92	22,80	253,62
Marzo	83,24	48,53	111,36	21,55	264,69
Abril	61,81	53,87	110,44	18,21	244,33
Mayo	17,84	136,59	26,29	21,59	202,31
Junio	7,39	200,60	15,55	27,26	250,80
Julio	3,12	313,38	3,92	39,36	359,78
Agosto	4,98	279,26	5,49	35,75	325,48
Septiembre	12,86	144,37	9,85	20,99	188,07
Octubre	50,92	73,67	55,98	19,42	200,00
Noviembre	106,41	19,74	82,42	21,25	229,82
Diciembre	210,35	1,24	88,10	36,41	336,10

Figura 7.42: Consumos del Taller docente - Escenario 4-1

Figura 7.43: Esquema de la simulación del Taller Docente - Escenario 4-1 - Modos Calefacción y Refrigeración

7.2.3.f. Escenario 4-2: Taller equipado con bomba de calor agua-aire alimentada mediante geotermia y vidrio con cámara controlado automáticamente

En este escenario el sistema de control puede elegir entre los modos de funcionamiento resumidos en la Tabla 7.36. Así, cuando la temperatura interior se encuentra entre el límite inferior y superior de confort, el sistema entra en Modo Acumulación. En cambio, si la temperatura interior disminuye por debajo de la temperatura de confort es necesario que se active uno de los dos modos de calefacción disponible. En este punto el sistema compara las temperaturas del agua acumulada a través del vidrio activo (Tanque Sal. Vidrio - Figura 7.47) y del agua que proviene del intercambiador geotérmico, empleándose la que tenga una temperatura superior para alimentar la bomba de calor. Esto permite aprovechar la energía almacenada en el depósito a través del vidrio activo. Finalmente, si la temperatura interior del taller supera la temperatura de confort, el controlador activa el Modo Refrigeración en cuyo caso el agua que alimenta la bomba de calor proviene del intercambiador geotérmico. Es necesario indicar que en Modo de Refrigeración el vidrio activo sigue en funcionamiento de tal manera que la circulación del agua contribuye a reducir las cargas solares internas.

Este algoritmo se ha implementado en TRNSYS mediante una serie de ecuaciones en el elemento Control Modo (Figura 7.45), detalladas en el Anexo H.

El recorrido del fluido en los Modos Acumulación, Refrigeración, Calefacción y Calefacción asistida puede verse en las Figuras 7.45, 7.46, 7.47 y 7.48 respectivamente.

Tabla 7.36: Modos de funcionamiento disponibles - Escenario 4-2

Modo	Condiciones
Acumulación	$T_{confort-inf} \leq T_{int} \leq T_{confort-sup}$
Calefacción	$T_{int} < T_{confort-inf}$ y $T_{geo} > T_{vid}$
Calefacción asistida	$T_{int} < T_{confort-inf}$ y $T_{vid} \geq T_{geo}$
Refrigeración	$T_{int} > T_{confort-sup}$

Figura 7.44: Diagrama de flujo del algoritmo del sistema de control - Escenario 4-2

Figura 7.45: Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Acumulación

Figura 7.46: Esquema de la simulación - Escenario 4-2- Modo Refrigeración

Figura 7.47: Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Calefacción

Figura 7.48: Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Calefacción Asistida

En la Figura 7.49 se presentan los resultados de la simulación del Escenario 4-2 para un día con demanda de calefacción, concretamente el 2 de enero, que abarca el periodo comprendido entre las 24 y las 48 h de las 8760 horas que componen un año. En esta figura se observa como cuando la temperatura interior del taller (línea de color rojo en la gráfica superior) supera límite superior de confort (21°C), el controlador activa el Modo Acumulación (línea de color verde en la gráfica inferior).

Figura 7.49: Activación del Modo Acumulación por el controlador

Por otro lado, en la Figura 7.50 se muestra como actúa el controlador en caso de que exista demanda de calefacción. En primer lugar se comprueba si la temperatura del agua acumulada mediante el vidrio (línea de color azul en la gráfica superior) es superior a la provista por el intercambiador geotérmico (línea de color marrón en la gráfica superior). Si esta condición no se cumple, tal y como ocurre a las 8:00 h (hora 32), se activa el Modo Calefacción (línea de color rosa en la gráfica inferior). Por el contrario, si la temperatura del agua acumulada por el vidrio supera la del intercambiador geotérmico, lo que ocurre a partir de las 8:00 h, el controlador activa el Modo Calefacción Asistida cuando es necesario (línea de color celeste en la gráfica inferior).

Los consumos mensuales para este escenario se presentan en la Tabla 7.37, y quedan representados en la Figura 7.51; mientras que los consumos anuales totales y superficiales se recogen en la Tabla 7.38. Por último en la Tabla 7.39 se indican las emisiones correspondientes de CO_2 .

Figura 7.50: Activación del Modo Calefacción / Calefacción Asistida

Tabla 7.37: Consumos mensuales del taller docente - Escenario 4-2

Mes	Calefacción (kWh)	Refrigeración (kWh)	Ventilación (kWh)	Bombeo (kWh)	Total (kWh)
Enero	130,16	1,40	104,58	20,18	256,31
Febrero	93,66	4,27	111,05	18,37	227,35
Marzo	57,57	17,43	129,46	21,01	225,47
Abril	41,26	19,68	123,68	20,72	205,34
Mayo	11,76	58,11	68,86	24,83	163,56
Junio	5,43	83,22	47,10	27,96	163,71
Julio	1,98	129,93	33,33	35,09	200,33
Agosto	3,04	122,40	25,41	34,32	185,17
Septiembre	7,61	72,40	39,79	27,52	147,32
Octubre	29,07	33,70	50,21	21,88	134,85
Noviembre	73,23	7,74	77,14	19,29	177,41
Diciembre	143,06	0,00	105,22	20,87	269,15

Tabla 7.38: Consumos anuales del taller docente - Escenario 4-2

Consumo	Calefacción	Refrigeración	Ventilación	Bombeo	Total
Total (kWh/año)	597,8	550,3	915,8	292,0	2356,0
Superficial (kWh/(año m ²))	15,3	14,1	23,5	7,5	60,4

Tabla 7.39: Emisiones dióxido carbono - Escenario 4-2

Emisiones CO ₂	
Totales (kg CO ₂ /año)	213,41
Por unidad de superficie (kg CO ₂ /(año m ²))	5,47

Figura 7.51: Consumos del Taller docente - Escenario 4-2

7.3. Evaluación económica de los escenarios

Según establece la Directiva 2010/31/UE [7] relativa a la eficiencia energética en los edificios, las medidas para mejorar su eficiencia energética deben considerar, entre otros factores, la rentabilidad en términos de coste-eficacia. Así, con idea de obtener una aproximación al coste de los escenarios simulados, se presenta a continuación una evaluación económica básica de cada uno de ellos (Tabla 7.40) según los precios obtenidos a partir del Generador de precios de la construcción para España de CYPE Ingenieros, S.A. [262]. Esta evaluación consiste en determinar el Valor Actual Neto (VAN) de la inversión necesaria para rehabilitar el taller docente suponiendo un plazo de 30 años, entendido como la diferencia entre el valor actual de la actuación del cambio de vidrios e instalaciones del taller, y el coste de llevarlas a cabo. Se indican también la tasa interna de retorno (TIR), junto con el periodo en el que se recuperaría la inversión realizada (PRI) calculados a partir de los costes e intereses indicados en la Tabla 7.41. Por otro lado, los flujos de caja para cada uno de los escenarios se incluyen en el Anexo I.- Evaluación económica de los escenarios.

Tabla 7.40: Variación de consumos anuales e inversión para cada escenario

Escenario	Ahorro energía (kWh/año)	Inversión necesaria (€)
1	Ref.	0
2	1412,28	15.503,91
3-1	1511,18	17.350,31
3-2	1714,44	20.163,36
4-1	1750,21	26.135,03
4-2	2561,95	33.154,75

Tabla 7.41: Parámetros considerados en evaluaciones económicas

Coste electricidad (€/kWh)	0,23 ⁶
Incremento anual coste electricidad (%)	10
Tipo de interés (%)	2
Vida útil instalación (años)	30

7.3.1. Evaluación económica del Escenario 2

Para el Escenario 2, en el que se mantienen los vidrios SGG Stadip Clear 44.1 y se sustituye la bomba de calor aire-aire por una bomba de calor geotérmica agua-aire. El presupuesto de la inversión para este escenario es de 15.503,91 €, que supone un coste superficial de 374,37 €/m² (Tabla 7.42).

Tabla 7.42: Presupuesto de la renovación - Escenario 2

BC GEOTÉRMICA	Cantidad	Coste (€/ud.)	Total (€)
Equipo Bomba de calor Trane GEH035 ⁷ (ud.)	1	7.526,09	7.526,09
Intercambiador geotérmico horizontal (m)	400	7,43	2.972,00
Sist. Control y accesorios	1	1.171,79	1.171,79
Bombas circuladoras (ud.)	3	320,52	961,56
Tuberías PE alta densidad De=20 mm (m)	25	78,76	1.969,00
SUBTOTAL BC GEOTÉRMICA			15.503,91
INVERSIÓN TOTAL			15.503,91 €
INVERSIÓN SUPERFICIE TALLER			374,37 €/m ²

⁶Estimado a partir de la página web de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, <http://facturaluz.cnmec.es>

⁷Coste estimado a partir de un modelo similar disponible en España.

Figura 7.52: Flujos netos acumulados - Escenario 2

En cuanto a la rentabilidad de la inversión, a partir de los flujos netos de la figura 7.52 se obtiene un VAN a 30 años de 16.044,52 €, con una TIR del 6% y un periodo de retorno de la inversión (PRI) de 19,3 años (Tabla 7.43).

Tabla 7.43: Rentabilidad y recuperación inversión - Escenario 2

VAN	TIR	PRI
16.044,52 €	6 %	19,3 años

7.3.2. Evaluación económica del Escenario 3-1

En el escenario 3-1 además de emplearse una bomba de calor agua-aire se sustituyen los vidrios originales por unos vidrios dobles claros (6/8/6) con cámara. Al renovarse los vidrios, el presupuesto es ligeramente mayor que en el Escenario 2 (Tabla 7.44). El VAN, a partir de los flujos de la Figura 7.53, resulta ser de 16.407,79 € (Tabla 7.45), similar al del Escenario 2. Además, se obtiene la misma TIR del 6% que en dicho escenario, aunque el periodo de recuperación (PRI) aumenta ahora hasta los 19,7 años.

Tabla 7.44: Presupuesto de la renovación - Escenario 3-1

VIDRIOS	Cantidad	Coste (€/ud.)	Total (€)
Vidrio doble claro 6/8/6 (m ²)	30,17	61,2	1.846,40
SUBTOTAL VIDRIOS			1.846,40 €
BC GEOTÉRMICA	Cantidad	Coste (€/ud.)	Total (€)
Equipo Bomba de calor Trane GEH035 (ud.)	1	7.526,09	7.526,09
Intercambiador geotérmico horizontal (m)	400	7,43	2.972,00
Sist. Control y accesorios	1	1.171,79	1.171,79
Bombas circuladoras (ud.)	3	320,52	961,56
Tuberías PE alta densidad De=20 mm (m)	25	78,76	1.969,00
SUBTOTAL BC GEOTÉRMICA			15.503,91 €
INVERSIÓN TOTAL			17.350,31 €
INVERSIÓN SUPERFICIE TALLER			444,88 €/m ²

Figura 7.53: Flujos netos acumulados - Escenario 3-1

Tabla 7.45: Rentabilidad y recuperación inversión - Escenario 3-1

VAN	TIR	PRI
16.407,49 €	6 %	19,7 años

7.3.3. Evaluación económica del Escenario 3-2

El escenario 3-2 se diferencia del escenario 3-1 en la sustitución de los vidrios dobles claros por vidrios dobles de control solar, aunque empleando la misma configuración (6/8/6). Respecto al sistema de acondicionamiento, se mantiene la bomba de calor agua-aire. Los vidrios de control solar, tienen un coste superior al de los vidrios claros, por lo que el presupuesto de la renovación aumenta hasta los 20.163,36 € (Tabla 7.46), y el coste por unidad de superficie del taller asciende a 517,02 €/m². En este caso el valor del VAN obtenido a partir de los flujos indicados en la Figura 7.54 es de 35.121,07 €, mientras que la TIR alcanza el 8 %, y el periodo estimado de recuperación de la inversión (PRI) es de 16,7 años (Tabla 7.47).

Figura 7.54: Flujos netos acumulados - Escenario 3-2

Tabla 7.46: Presupuesto de la renovación - Escenario 3-2

VIDRIOS	Cantidad	Coste (€/ud.)	Total (€)
Vidrio doble control solar 6/8/6 (m ²)	30,17	154,44	4.659,45
SUBTOTAL VIDRIOS			4.659,45 €
BC GEOTÉRMICA	Cantidad	Coste (€/ud.)	Total (€)
Equipo Bomba de calor Trane GEH035 (ud.)	1	7.526,09	7.526,09
Intercambiador geotérmico horizontal (m)	400	7,43	2.972,00
Sist. Control y accesorios	1	1.171,79	1.171,79
Bombas circuladoras (ud.)	3	320,52	961,56
Tuberías PE alta densidad De=20 mm (m)	25	78,76	1.969,00
SUBTOTAL BC GEOTÉRMICA			15.503,91 €
INVERSIÓN TOTAL			20.163,36 €
INVERSIÓN SUPERFICIE TALLER			517,01 €/m ²

Tabla 7.47: Rentabilidad y recuperación inversión - Escenario 3-2

VAN	TIR	PRI
35.121,07 €	8 %	16,7 años

7.3.4. Evaluación económica del Escenario 4-1

En el escenario 4-1 se sustituyen los vidrios pasivos por vidrios activos con cámara de agua en circulación. Su funcionamiento, en este caso, está asociado al sistema de acondicionamiento. Lógicamente esto implica un aumento en la complejidad de las instalaciones necesarias, lo que repercute directamente en el presupuesto que se eleva hasta los 26.135,03 €, y que supone 670,13 €/m² (Tabla 7.49). Por otro lado, a partir de los flujos acumulados de la Figura 7.55 se obtiene un VAN de 12.936,02 €, una TIR del 4 % y un periodo de recuperación de la inversión (PRI) de 22,1 años.

Figura 7.55: Flujos netos acumulados - Escenario 4-1

Tabla 7.48: Rentabilidad y recuperación inversión - Escenario 4-1

VAN	TIR	PRI
12.936,02 €	4 %	22,1 años

Tabla 7.49: Presupuesto de la renovación - Escenario 4-1

VIDRIOS	Cantidad	Coste (€/ud.)	Total (€)
Vidrio activo doble con cámara agua (m ²)	24,64	225 ⁸	5.544,00
Vidrio doble control solar 6/8/6 (m ²)	5,53	154,44	854,05
Bombas de circulación	2	320,52	641,04
Colector hidráulico	1	287,62	287,62
Vaso expansión	1	154,01	154,01
Tuberías PE alta densidad	40	78,76	3.150,40
Otros accesorios			531,56
SUBTOTAL VIDRIOS			10.631,12 €
BC GEOTÉRMICA	Cantidad	Coste (€/ud.)	Total (€)
Equipo Bomba de calor Trane GEH035 (ud.)	1	7.526,09	7.526,09
Intercambiador geotérmico horizontal (m)	400	7,43	2.972,00
Sist. Control y accesorios	1	1.171,79	1.171,79
Bombas circuladoras (ud.)	3	320,52	961,56
Tuberías PE alta densidad De=20 mm (m)	25	78,76	1.969,00
SUBTOTAL BC GEOTÉRMICA			15.503,91 €
INVERSIÓN TOTAL			26.135,03 €
INVERSIÓN SUPERFICIE TALLER			670,13 €/m ²

7.3.5. Evaluación económica del Escenario 4-2

Por último, en el escenario 4-2 el vidrio activo con agua en circulación es controlado de manera independiente al sistema de acondicionamiento. El presupuesto en este caso es de 33.154,75 €, lo que supone un coste de 850,12 €/m² (Tabla 7.50). A partir de los valores de la Figura 7.56 se obtienen un VAN 24.075,82 €, una TIR del 5 %, así como un PRI de 21,7 años (Tabla 7.51).

⁸Estimación preliminar a partir de datos del Proyecto Europeo InDeWaG, <http://www.indewag.eu>.

Tabla 7.50: Presupuesto de la renovación - Escenario 4-2

VIDRIOS	Cantidad	Coste (€/ud.)	Total (€)
Vidrio activo doble con cámara agua (m ²)	24,64	225	5.544,00
Vidrio doble control solar 6/8/6 (m ²)	5,53	154,44	854,05
Bombas de circulación	2	320,52	641,04
Colector hidráulico	1	287,62	287,62
Vaso expansión	1	154,01	154,01
Tuberías PE alta densidad	40	78,76	3.150,40
Otros accesorios			531,56
Depósito acumulación vidrio activo	1	6.629,12	6.629,12
Sistema de control vidrio activo	1	585,90	585,90
SUBTOTAL VIDRIOS			17.650,84
BC GEOTÉRMICA	Cantidad	Coste (€/ud.)	Total (€)
Equipo Bomba de calor Trane GEH035 (ud.)	1	7.526,09	7.526,09
Intercambiador geotérmico horizontal (m)	400	7,43	2.972,00
Sist. Control y accesorios	1	1.171,79	1.171,79
Bombas circuladoras (ud.)	3	320,52	961,56
Tuberías PE alta densidad De=20 mm (m)	25	78,76	1.969,00
SUBTOTAL BC GEOTÉRMICA			15.503,91 €
INVERSIÓN TOTAL			33.154,75 €
INVERSIÓN SUPERFICIE TALLER			850,12 €/m ²

Tabla 7.51: Rentabilidad y recuperación inversión - Escenario 4-2

VAN	TIR	PRI
24.072,82 €	5 %	21,7 años

Figura 7.56: Flujos netos acumulados - Escenario 4-2

Discusión de resultados

If you torture the data long enough, it will confess.

Ronald Coase

En este capítulo se presenta, en primer lugar, un análisis de los resultados experimentales obtenidos en los diferentes ensayos. A continuación se plantea la discusión de los resultados de simulación mediante TRNSYS v17, seguida por la discusión de los resultados de la evaluación económica realizada para cada uno de los escenarios simulados.

8.1. Discusión de los resultados experimentales

Los resultados que se exponen a continuación tienen su origen en los distintos ensayos llevado a cabo en la instalación experimental descrita en el Capítulo 4.- Metodología Documental y Experimental.

8.1.1. Efecto del controlador sobre la temperatura interior

Según se ha visto en los resultados experimentales expuestos en el Capítulo 7, la circulación del agua a través de la cámara da lugar a una reducción en la temperatura interior del módulo activo. Para un caudal volumétrico dado (Q) se observa que cuanto mayor es el nivel de radiación, mayor es la diferencia entre las temperaturas interiores máximas de los módulos ensayados (Tabla 8.1). Este comportamiento puede apreciarse también en la parte derecha de la Figura 8.1. Obviamente esta relación se cumplirá siempre que la capacidad total de absorción de energía por parte del agua en circulación no se vea excedida.

Tabla 8.1: Resultados de ensayos en cond. de demanda de calefacción

Día	Nivel Irradiación	Irrad. solar máxima (W/m^2)	$(\Delta T_{ref-activo})_{m\acute{a}x}$
14/02/2013	Alto	622	23,5°C
16/02/2013	Medio	550	14,4°C
17/02/2013	Bajo	275	1,7°C

Por otro lado, según los resultados obtenidos por Pérez-Pujazón [85], cuando el agua contenida en el vidrio activo se encuentra en reposo el vidrio activo se comporta de forma similar a un vidrio monolítico claro de 6 mm. Este comportamiento es debido a la alta conductividad térmica del agua y puede apreciarse en la parte central de la Figura 8.1, sombreada en gris. Así, se observa como efectivamente las temperaturas del módulo de referencia, en color rojo, y del módulo equipado con el vidrio activo, en color azul, coinciden en esta parte de la figura.

Contrariamente, en la parte derecha de la Figura 8.1, se observa como cuando circula agua a través de la cámara la temperatura interior del módulo equipado con el vidrio activo es menor que la temperatura del módulo de referencia que monta el vidrio sencillo.

Figura 8.1: Comportamiento vidrio activo según velocidad. Fuente: Pérez-Pujazón [85]

Volviendo a los resultados experimentales, en la Figura 8.2 la curva de temperatura del módulo activo (línea de color rojo) se correspondería con la circulación de un caudal Q a través de la cámara del acristalamiento, mientras que la curva de temperatura del módulo de referencia (línea de color azul) equivaldría a una cámara con agua en reposo ($Q = 0$ l/min). Este criterio de colores, aunque contrario de la Figura 8.1, es el que se seguirá a lo largo de todo este capítulo.

Si, partiendo de una situación de reposo en la cámara, el caudal que circula a través de ella tomara un valor Q_1 tal que $0 < Q_1 < Q$, donde Q es el caudal empleado en el módulo experimental, la variación de la velocidad del agua a través de la cámara daría lugar a la curva a trazos de color celeste (Q_1) indicada en la Figura 8.2.

Figura 8.2: Curva hipotética Q_1 generada por el sistema de control

Si ahora se aumentara este caudal Q_1 hasta un caudal Q_2 , de manera que $Q_1 < Q_2 < Q$, se obtendría la curva a trazos de color verde (Q_2) de la Figura 8.3.

Figura 8.3: Curvas hipotéticas Q_1 y Q_2 generadas por el sistema de control

Si a continuación se incrementara el valor del caudal anterior Q_2 hasta un valor Q_3 cumpliéndose que $Q_2 < Q_3 < Q$ se obtendría la curva a trazos de color naranja (Q_3) de la Figura 8.4.

Figura 8.4: Curvas hipotéticas Q_1 , Q_2 y Q_3 generadas por el sistema de control

Por tanto, si se toman como valores extremos las curvas obtenidas para los módulos de referencia y activo de la Figura 8.5, considerando el primero como un caso límite inferior en el que no circula fluido ($Q=0$ l/min), y el segundo para un determinado caudal, en este caso (Q), el uso del controlador podría dar lugar a las curvas de temperaturas a trazos (Q_1 , Q_2 , y Q_3) comprendidas entre estas dos curvas extremas de la Figura 8.5. Además, el controlador podría hacer que el sistema pasara de una curva a otra optimizando el consumo energético según las condiciones ambientales concretas de la instalación en cada momento según la línea negra a trazos ($Q_{\text{óptimo}}$).

Figura 8.5: Conjunto de curvas hipotéticas generadas por el sistema de control

No obstante, es necesario tener en cuenta que según Chow [87] este efecto reductor de las temperaturas internas no se incrementa indefinidamente, sino que depende de los niveles de irradiación solar, temperatura interior (T_r) y temperatura de aire exterior (T_a); y disminuye notablemente cuando la velocidad de flujo a través de la cámara alcanza los 0,01 m/s (Figura 8.6).

Debido a los condicionantes relativos al diseño de la instalación, en el caso de la presente investigación los ensayos se han realizado con un caudal constante ($Q=0,67$ l/min) limitado por la potencia de la bomba disponible y las características particulares del circuito hidráulico en el montaje experimental. Este caudal daba lugar a una velocidad a través de la cámara de 0,0016 m/s, muy inferior al límite indicado por Chow, y que permitía además mantener el régimen laminar en el acristalamiento, de tal manera que su nivel de transparencia no se viera afectado.

De esta forma, en esta instalación el controlador podría incrementar la velocidad de flujo más de seis veces antes de llegar al valor límite, lo que permitiría una disminución mayor de las temperaturas interiores de los módulos que la alcanzadas en los experimentos analizados.

Figura 8.6: Efecto de la velocidad del agua sobre la captación de energía. Fuente: Chow [87]

8.1.2. Efecto del controlador sobre la temperatura del agua acumulada

Una vez que se ha visto el efecto del controlador sobre la temperatura interior de los módulos, se va a analizar que efecto produce sobre la temperatura del agua almacenada en el tanque.

Así, para el día 14/02/2013 (Figura 8.7), considerado como un día con nivel alto de radiación, la temperatura máxima de acumulación alcanzada, $(T_{tanque})_{max}$, es de $20,6^{\circ}\text{C}$ y se alcanza sobre las 19:50 h (Tabla 8.2). No obstante, el agua acumulada se mantiene por encima de los 20°C desde las 15:00 h aproximadamente. Esto sugiere que, para este nivel de radiación y de temperatura ambiente, esta sería la temperatura límite a la que las ganancias del sistema se igualan a las pérdidas.

En el caso del día 16/02/2013 (Figura 8.8), tomado como un día con nivel de radiación solar medio, la temperatura máxima de 17°C para el agua acumulada se alcanza sobre las 18:30 h. Aunque, al igual que ocurre en el caso anterior, se alcanzan valores próximos a ella desde las 16:00 h. En cuanto al día 17/02/2013 (Figura 8.9), el nivel de radiación solar es tan bajo que nunca llega a activarse el Modo Acumulación.

Figura 8.7: Modos de funcionamiento - Nivel alto radiación solar - 14/02/2013

Figura 8.8: Modos de funcionamiento - Nivel medio radiación solar - 16/02/2013

Figura 8.9: Modos de funcionamiento - Nivel bajo radiación solar - 17/02/2013

Según los valores recogidos en la Tabla 8.2, el controlador permite acumular agua a mayor temperatura cuando mayor es el nivel de radiación solar. De esta forma, existirá un valor crítico de irradiación a partir del cual la energía destinada al bombeo será menor que la energía extraída del interior (en condiciones de demanda de refrigeración), o la extraída del agua acumulada por el ambiente interior del módulo (en condiciones de demanda de calefacción).

Por lo tanto, mediante la programación de un algoritmo apropiado el controlador podría entrar en funcionamiento únicamente a partir de ciertos valores de irradiancia, limitando el número de horas de funcionamiento de la bomba, y optimizando de esta forma el funcionamiento de la instalación.

Tabla 8.2: Temperaturas máximas del tanque en cond. de demanda de calefacción

Día	Nivel radiación	Irrad. max (W/m ²)	$(T_{tanque})_{max}$ (°C)	Hora $(T_{tanque})_{max}$
14/02/2013	Alto	622	20,6	19:50
16/02/2013	Medio	550	17,6	18:30
17/02/2013	Bajo	275	—	—

Sin embargo, no toda la energía captada en forma de agua templada es susceptible de ser aprovechada, sino que la reducción del consumo del módulo experimental dependerá directamente de la temperatura del agua acumulada en el momento en el que exista una demanda efectiva de calefacción, y se active el Modo Calefacción Asistida. Esto resalta la importancia de contar con un nivel elevado de aislamiento tanto en las conducciones que llevan el agua desde el acristalamiento hasta el tanque, como del propio tanque de acumulación.

En condiciones de demanda de calefacción, es interesante definir la diferencia entre la temperatura del agua del tanque (T_{tanque}) y la temperatura ambiente (T_{amb}) en el momento en el que es necesario activar la calefacción, entendida como una diferencia efectiva de temperaturas (ΔT_{efec}) dada por la ecuación 8.1. Los valores de esta diferencia efectiva obtenidos para los días estudiados se recogen en la Tabla 8.3.

$$\Delta T_{efec} = (T_{tanque} - T_{amb})_{cal} \quad (8.1)$$

En el caso del día 14/02/2013, la diferencia de temperaturas efectiva tiene un valor de 12,8°C para un nivel de radiación clasificado como alto (Figura 8.10). Para el día 16/02/2013, considerado como un día con un nivel de radiación medio (Figura 8.11), esta diferencia tiene un valor de 5,9°C. Por último, la ausencia de radiación solar en el día 17/02/2013 hace que en este caso la diferencia descienda hasta un valor prácticamente nulo (Figura 8.12). Aunque la diferencia efectiva de temperaturas (ΔT_{efec}) proporciona una idea del rendimiento de captación del vidrio en Modo Acumulación en cada caso, este dato debería considerarse junto a la temperatura del agua almacenada en el tanque en el momento en el que se activa dicho Modo Acumulación (T_{i-acu}) (Tabla 8.3). Es decir, la temperatura a la que se encuentra el agua al activarse el Modo Calefacción asistida no sólo depende del rendimiento de captación, sino de la temperatura a la que se empieza a acumular el agua.

Tabla 8.3: ΔT_{efec} en cond. de demanda de calefacción

Día	Nivel radiación	Irrad. máx. (W/m ²)	T_{i-acu} (°C)	ΔT_{efec} (°C)	Hora act. calefacción
14/02/2013	Alto	622	11,25	12,8	22:45 h
16/02/2013	Medio	550	10,63	5,9	20:08 h
17/02/2013	Bajo	275	—	0,7	12:40 h

Figura 8.10: Influencia radiación solar - Radiación solar alta

Tal y como se puede observar en los valores recogidos en la Tabla 8.3, cuanto mayor es el nivel de radiación solar mayor es la temperatura que alcanza el módulo solar, y más tiempo transcurre hasta que es necesario seleccionar el Modo Calefacción por parte del controlador. El caso extremo se presenta el día 17/02/2013, donde la ausencia de radiación solar impide la activación del Modo Acumulación, y a las 12:40 h ya es necesario activar el Modo Calefacción Eléctrica, con el consiguiente incremento de consumo.

Figura 8.11: Influencia radiación solar - Radiación solar media

Figura 8.12: Influencia radiación solar - Radiación solar baja

Respecto a la velocidad de circulación del fluido en el Modo Acumulación, según se ha expuesto en el apartado 8.1.1, una mayor velocidad de flujo a través de la cámara da lugar a un aumento de la eficiencia en la captación de la energía por parte del agua que circula. Sin embargo, al aumentar la velocidad el tiempo de residencia del agua en la cámara se ve reducido, lo que conlleva una disminución de su temperatura de salida. Esto es, un incremento en la velocidad del fluido le permite captar una mayor cantidad de energía del interior del módulo a expensas de un menor incremento en su temperatura de salida de la cámara.

Por lo tanto, en condiciones de demanda de refrigeración sería deseable una velocidad de circulación del fluido a través de la cámara cercana al límite de 0,01 m/s con objeto de captar la mayor cantidad de energía posible y reducir así la temperatura interior. Por el contrario, en condiciones de demanda de calefacción, sería más interesante reducir la velocidad de flujo del fluido para, de esta forma, incrementar al máximo su temperatura y emplearlo posteriormente para alimentar una bomba de calor agua-aire (o agua-agua). Estos resultados muestran el potencial del empleo de un controlador en este tipo de acristalamientos bajo diferentes condiciones ambientales y según el algoritmo programado.

8.1.3. Efectos del controlador sobre el consumo nocturno

Tal y como se ha indicado en el Capítulo 7. Resultados, el vidrio activo permite acumular energía en forma de calor sensible en el tanque. Dicha energía es cedida posteriormente cuando se activa el Modo Calefacción Asistida y el agua circula a través del vidrio (Tabla 8.4).

Tabla 8.4: Consumos de los módulos de ensayo en cond. de demanda de calefacción

Día	Nivel radiación	Irrad. máx. (Wh)	Energía acumulada (Wh)	Energía cedida (Wh)
14/02/2013	Alto	622	920,0	905,0
16/02/2013	Medio	550	759,8	802,7
17/02/2013	Bajo	275	—	—

En cada una de las Figuras 8.13 y 8.14 se representa la energía captada y cedida, según el modo de funcionamiento del controlador para los días con niveles de radiación alta y media respectivamente. En ellas se aprecia como cuanto mayor es el nivel de radiación mayor cantidad de energía se acumula. Es interesante señalar, además, como en los días analizados prácticamente toda la energía captada por el vidrio activo y acumulada en la instalación experimental es cedida posteriormente al ambiente interior del módulo. No obstante, este comportamiento no debe tomarse como una regla general, ya que tanto la energía captada como la cedida dependerán de diversas variables como las condiciones climáticas, el nivel de aislamiento del tanque o las características constructivas del módulo ensayado, que aportará un nivel más o menos elevado de inercia térmica. Por lo tanto, antes de generalizar este comportamiento sería necesario llevar a cabo experimentos a escala real con soluciones constructivas y de almacenamiento específicas. Es también necesario apuntar como, en el caso del día con radiación solar media, la energía cedida es ligeramente mayor que la acumulada. La razón es que la temperatura del agua almacenada al desactivarse el Modo Calefacción Asistida es algo inferior a la temperatura en el momento en el que el sistema de control activa el Modo Acumulación.

Figura 8.13: Curvas de energía acumulada y cedida - Radiación solar alta

Figura 8.14: Energía acumulada y cedida - Radiación solar media

A partir de los consumos nocturnos de los módulos durante los días estudiados, expuestos en la Tabla 8.5 y representados en las Figuras 8.15, 8.16 y 8.17, puede constatarse como en la instalación experimental el ahorro es mayor cuanto mayor es el nivel de radiación solar incidente. Esto se debe a dos motivos: por un lado, un elevado nivel de radiación retrasa la necesidad de activar la calefacción en el módulo activo en más de dos horas, desde las 20:08 hasta las 22:45 h; por otro lado, el incremento de temperatura efectivo del agua acumulada (ΔT_{efec}) en el caso del nivel elevado de radiación es casi 7°C mayor que el obtenido para el nivel medio (Tabla 8.3).

Tabla 8.5: Consumos de los módulos de ensayo - Cond. de demanda de calefacción

Día	Nivel radiación	Consumo Módulo referencia (Wh)	Consumo Módulo activo (Wh)	Variación Consumo (Wh)	Variación Porcentaje
14/02/2013	Alto	426,0	386,3	-39,7	-9,3 %
16/02/2013	Medio	470,3	441,1	-29,2	-6,2 %
17/02/2013	Bajo	406,5	404,9	-1,6	-0,3 %

Figura 8.15: Curvas de consumo nocturno - Radiación solar alta

Figura 8.16: Curvas de consumo nocturno - Radiación solar media

Figura 8.17: Curvas de consumo nocturno - Radiación solar baja

Según puede observarse en la Tabla 8.6, la cantidad de energía aprovechada en el módulo activo se incrementa conforme lo hace el nivel de radiación solar. En cuando a los Rendimientos obtenidos, entendidos como el cociente entre la energía aprovechada y la acumulada expresado porcentualmente, conviene apuntar que aunque son reducidos, probablemente se verían incrementados en una instalación experimental en la que la configuración del vidrio activo, la bomba circuladora, los niveles de aislamientos y el algoritmo de funcionamiento estuvieran optimizados.

Tabla 8.6: Rendimientos de los módulos de ensayo en cond. de demanda de calefacción

Día	Energía acumulada (Wh)	Energía aprovechada (Wh)	Rendimiento
14/02/2013	920,0	39,7	4,3 %
16/02/2013	759,8	29,2	3,8 %
17/02/2013	—	1,6	—

Considerando los resultados experimentales expuestos puede concluirse que resulta posible optimizar las prestaciones de un módulo de ensayo equipado con un vidrio activo mediante el sistema de control domótico diseñado y ensayado. De forma adicional, estos resultados ponen de relieve la posibilidad de programar el sistema de control empleado con algoritmos de una relativa complejidad, de manera que se lleven a cabo acciones de control irrealizables por elementos de control sencillos, como podría ser un termostato.

Además, a partir del empleo de este sistema de control es posible reducir las temperaturas interiores del módulo durante las horas de radiación solar, almacenando la energía captada por el agua que circula a través del vidrio en forma de agua a una temperatura superior a la ambiente. Dicho almacenamiento es técnicamente posible únicamente a partir de unos niveles determinados de radiación solar, y será económicamente viable únicamente bajo determinadas condiciones. Este agua almacenada puede utilizarse posteriormente para reducir el consumo de los módulos en situaciones con demanda de calefacción, por ejemplo en ausencia de radiación solar.

Por otro lado, se constata que los vidrios con agua en circulación que emplean una sola cámara son eficaces como captadores de energía, pero no son apropiados como elementos radiantes acondicionadores debido a la diferencia entre los gradientes térmicos del agua circulante y los ambientes interior y exterior.

En condiciones de demanda de refrigeración, se aprecia como el controlador permite liberar hacia el ambiente exterior la energía captada en la instalación experimental mediante el empleo de un Modo Enfriamiento Gratuito.

8.2. Discusión de los resultados de simulación

En esta sección se analizan los resultados obtenidos para los escenarios simulados del taller docente estudiado (Figura 8.18) en sus distintas configuraciones de vidrios planteadas (Tabla 8.7). En primer lugar se presentan los consumos obtenidos en calefacción, seguidos de los consumos en refrigeración y por último los consumos totales.

Figura 8.18: Taller Docente situado en la ETS Arquitectura. Fuente: Archivo propio

Tabla 8.7: Escenarios considerados en las simulaciones

Escenario	Sist. acond.	Vidrio S/E/O	Vidrio N
1	BC aire-aire	SGG Stadip Clear 44.1	SGG Stadip Clear 44.1
2	BC agua-aire	SGG Stadip Clear 44.1	SGG Stadip Clear 44.1
3-1	BC agua-aire	Claro 6/8/6	Claro 6/8/6
3-2	BC agua-aire	Control solar 6/8/6	Control solar 6/8/6
4-1	BC agua-aire	Vidrio activo sin control	Control solar 6/8/6
4-2	BC agua-aire	Vidrio activo automático	Control solar 6/8/6

Aunque este mismo taller docente ya ha sido simulado en algunos escenarios que emplean vidrio activo por Pérez-Pujazón [85], en dichas simulaciones se ha supuesto un funcionamiento continuo

del vidrio activo durante las horas de ocupación (8-22 h), por lo que no se ha considerado el efecto que tendría un controlador sobre la demanda y el consumo energéticos del taller. Además, en las simulaciones comentadas el vidrio activo es empleado como elemento acondicionador del ambiente interior haciendo uso de una bomba de calor agua-agua, lo que, en condiciones de demanda de calefacción, podría ser menos eficiente que alimentar un conjunto formado por una bomba de calor agua-aire y un *fancoil* a partir del agua acumulada.

8.2.1. Consumos de calefacción

A partir de los consumos presentados en la Tabla 8.8 e ilustrados en la Figura 8.19, puede observarse como el Escenario 1 de simulación del taller docente, tomado como escenario de referencia, presenta el consumo de calefacción más elevado. Esto es consecuencia de emplear un vidrio laminar sin cámara de aire aislante y una bomba de calor aire-aire, menos eficiente que la bomba de calor geotérmica agua-aire empleada en el resto de escenarios.

Tabla 8.8: Consumos anuales de calefacción

Escenario	Consumo calefacción (kWh/año)	Ahorro
1	2335,9	Ref.
2	867,5	62,9 %
3-1	708,6	69,7 %
3-2	795,8	65,9 %
4-1	863,5	63,0 %
4-2	597,8	74,4 %

Figura 8.19: Consumo de calefacción en los distintos escenarios

En el Escenario 2, el empleo de la bomba de calor geotérmica agua-aire manteniendo los vidrios laminares sin cámara da lugar a una reducción del consumo en calefacción del 62,9 % (Figura 8.19). Mientras que en el Escenario 3-1 los vidrios dobles con cámara de aire empleados originan una disminución del consumo del 69,7 %, más reducido aún que el obtenido en el Escenario 2 para los vidrios sin cámara. Esto es debido al menor valor de transmitancia térmica de los vidrios con cámara ($U=3,21 \text{ W/m}^2\text{K}$) frente a los vidrios sin ella ($U=5,76 \text{ W/m}^2 \text{ K}$). Por otro lado el Escenario 3-2, que hace uso de un vidrio de control solar, presenta una reducción de consumo del 65,9 % con respecto al escenario de referencia. Esta reducción no llega a ser tan alta como la obtenida en el Escenario 3-1 (69,7 %), debido a que el Escenario 3-2 emplea vidrios dobles claros ($U=3,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $g=0,72$) con un valor de transmitancia térmica (U) algo mayor y con un factor solar (g) que permite un paso algo mayor de radiación que los de control solar ($U=2,76 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $g=0,41$).

Los escenarios que emplean vidrios activos se han denominado Escenario 4-1 y Escenario 4-2. En el Escenario 4-1 dichos vidrios activos carecen de un sistema de control propio, por lo que su funcionamiento esta directamente asociado a la operación del equipo de acondicionamiento (Figura 8.22). En este escenario 4-1 se obtiene una reducción de consumo del 63,0 %, similar a la reducción del 62,9 % obtenida en el Escenario 2. Es decir, el empleo del vidrio activo con un funcionamiento continuo asociado al equipo de acondicionamiento da lugar a un consumo en calefacción similar al de un vidrio laminar sin cámara, y algo mayor que obtenido para un vidrio de control solar con cámara de aire (Escenario 3-2). Esto se debe esencialmente a dos factores: el primero está relacionado con la reducción del nivel radiación que penetra en el taller docente simulado, al comportarse el vidrio

activo como un vidrio de control solar ($g=0,41$); el segundo es consecuencia directa de la ausencia de un controlador que permitiera emplear un Modo Acumulación en el Escenario 4-1. Dicha ausencia es responsable de que la circulación del fluido sea siempre la indicada mediante los colores azul y rojo en la Figura 8.22. Al carecer de este Modo Acumulación, que sí está presente en el Escenario 4-2 (Figura 8.23), no es posible elegir el origen del agua que se alimenta a la bomba de calor agua-aire. Esto es, no puede elegirse entre alimentar la bomba de calor mediante el agua acumulada o el agua que proviene del intercambiador geotérmico, por lo que en condiciones de calefacción la temperatura del agua que alimenta esta bomba de calor es menor que en escenario 4-2, lo que afecta negativamente a su rendimiento en condiciones de calefacción.

Por último, el Escenario 4-2 da lugar al menor consumo en calefacción de todos los planteados, con un ahorro del 74,4 % frente al escenario de referencia. Esto es debido fundamentalmente al empleo del controlador, que permite acumular agua a mayor temperatura (línea azul en la parte superior de la Figura 8.20) que la aportada por el intercambiador geotérmico (línea marrón en la parte superior de la Figura 8.20), de manera independiente al funcionamiento del sistema de acondicionamiento, lo que permite activar el Modo Calefacción Asistida (Figura 8.24) en lugar del Modo Calefacción (Figura 8.25), al contrario de lo que ocurre en el Escenario 4-1. Este efecto se refleja en Figura 8.20, donde puede verse como el sistema de control opta por activar el Modo Calefacción Asistida (línea azul en la gráfica inferior) que alimenta la bomba de calor con el agua acumulada, frente al Modo Calefacción (línea rosa en la gráfica inferior) que toma el agua del intercambiador geotérmico, para un día típico de demanda de calefacción (2 Enero).

Figura 8.20: Activación de los Modos Calefacción / Calefacción Asistida

A modo de resumen, la Figura 8.21 muestra contribución de cada uno de los vidrios empleados en los Escenarios 3-1, 3-2, 4-1 y 4-2 a la reducción del consumo de calefacción con respecto al vidrio laminar sin cámara del Escenario 2. En esta figura se ha tomado como referencia el Escenario 2 en lugar del Escenario 1 por ser el primero el que emplea una bomba de calor aire-agua, al igual que los escenarios 3-1, 3-2, 4-1 y 4-2.

Figura 8.21: Reducción de consumo de calefacción de cada escenario respecto al Escenario 2

Figura 8.22: Esquema de la simulación del Taller Docente - Escenario 4-1 - Modos Calefacción y Refrigeración

Figura 8.23: Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Acumulación

Figura 8.24: Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Calefacción Asistida

Figura 8.25: Esquema de la simulación - Escenario 4-2 - Modo Calefacción

Un enfoque alternativo, que permite evaluar la verdadera contribución de cada vidrio a la mejora de la eficiencia energética global del taller docente, consiste en considerar en que medida podría reducirse la energía sensible que aporta el intercambiador geotérmico a la bomba de calor agua-aire. Para entender este nuevo enfoque no sólo debe tenerse en cuenta la reducción de consumo de cada escenario, sino también la energía es aportada a la bomba de calor en forma de agua a una cierta temperatura mediante la instalación geotérmica o el vidrio activo, en cada caso.

Así, en el Escenario 4-1 (Figura 8.22) el vidrio activo funciona en todo caso asociado al sistema de acondicionamiento, alimentándose siempre a partir del intercambiador geotérmico y sin que exista la posibilidad de acumular el agua que circula a través del vidrio, ya que únicamente están disponibles los modos de funcionamiento calefacción, refrigeración y apagado (Tabla 8.9). Esto implica que en este caso el funcionamiento de las electroválvulas está indisolublemente unido a la puesta en marcha de la bomba de calor, sin que puedan variar su estado en otras circunstancias.

Tabla 8.9: Modos de funcionamiento disponibles - Escenario 4-1

Modo	Condiciones
Calefacción	$T_{int} < T_{comfort-inf}$
Refrigeración	$T_{int} > T_{comfort-sup}$
Apagado	$T_{comfort-inf} \leq T_{int} \leq T_{comfort-sup}$

Frente al funcionamiento descrito para el Escenario 4-1, en el Escenario 4-2 el controlador decide que modo de funcionamiento (Tabla 8.10) es conveniente activar en cada momento. La principal ventaja que aporta el controlador en condiciones de demanda de calefacción reside, por tanto, en su capacidad de decidir en cada instante el origen del agua con el que se alimenta la bomba de calor. De esta forma, tal y como se ha explicado anteriormente, si en un momento dado existe demanda de calefacción, el controlador lleva a cabo una comparación entre la temperatura del agua en el tanque alimentado por el vidrio activo (Tanque sal. vidrio en la Figura 8.23) y la que proviene del intercambiador geotérmico, según se active el Modo Calefacción Asistida o el Modo Calefacción respectivamente. Es decir, cuando exista demanda de calefacción la bomba de calor se alimentará a partir de la corriente con mayor temperatura, gracias a la acción del controlador. En cambio, en Modo Refrigeración, el vidrio activo se alimenta siempre del agua que proviene del intercambiador geotérmico, ya que normalmente esta se encontrará a menor temperatura que la almacenada en el tanque tras circular a través del vidrio activo.

Tabla 8.10: Modos de funcionamiento disponibles - Escenario 4-2

Modo	Condiciones
Acumulación	$T_{comfort-inf} \leq T_{int} \leq T_{comfort-sup}$
Calefacción	$T_{int} < T_{comfort-inf}$ y $T_{geo} > T_{vid}$
Calefacción asistida	$T_{int} < T_{comfort-inf}$ y $T_{vid} \geq T_{geo}$
Refrigeración	$T_{int} > T_{comfort-sup}$

De esta manera, en el caso del Escenario 4-2, el uso del Modo Acumulación (Figura 8.23) y la posterior utilización del agua acumulada mediante el vidrio activo a través del Modo Calefacción Asistida (Figura 8.24), dan lugar a una reducción de la energía aportada por la instalación geotérmica. En la Tabla 8.11 se muestran los valores de la energía sensible que se aporta a la corriente de entrada a la bomba de calor, junto con la contribución de cada una de las fuentes posibles: el vidrio activo (E. Vidrio Activo) o el intercambiador geotérmico (E. Geotermia), para cada mes del año. Estos valores se representan en la Figura 8.26, y a partir de ellos se observa como, en condiciones de demanda de calefacción, en el Escenario 4-2 el aporte del vidrio activo controlado automáticamente llega a alcanzar el 100 % de esta energía en ciertos meses (Figura 8.26), lo que quiere decir que, en dichos esos meses, el vidrio activo podría llegar a sustituir al intercambiador geotérmico. Así, este vidrio es capaz de aportar por sí mismo una media del 96 % de la energía sensible (E. vidrio activo) que se aporta a la corriente de entrada de la bomba de calor (Figura 8.27).

Tabla 8.11: Aportes de energía a la corriente de entrada a la bomba de calor

Mes	E. Vidrio Activo (kWh)	E. Geotermia (kWh)	E. total (kWh)	E. Vidrio Activo (%)	E. Geotermia (%)
Enero	839,86	68,18	903,44	93,0	7,0
Febrero	519,10	0	519,10	100	0
Marzo	386,19	12,80	396,60	97,4	2,6
Abril	320,50	0	320,50	100	0,0
Mayo	139,51	6,31	145,59	95,8	4,2
Junio	63,77	0,85	64,51	98,9	1,1
Julio	26,36	1,72	27,90	94,5	5,5
Agosto	41,35	1,25	42,30	97,8	2,2
Septiembre	105,88	2,70	107,61	98,4	1,6
Octubre	271,03	27,35	296,54	91,4	8,6
Noviembre	472,43	0	472,43	100	0
Diciembre	767,86	103,54	870,11	88,3	11,7

Figura 8.26: Aportes de energía sensible a la corriente de entrada de la bomba de calor

Figura 8.27: Consumos de calefacción según el origen de la corriente de entrada a la bomba de calor

8.2.2. Consumos de refrigeración

En lo que se refiere a los consumos de refrigeración, los resultados obtenidos para cada escenario se resumen en la Tabla 8.12 y, una vez representados, dan lugar a la Figura 8.28.

Tabla 8.12: Consumos anuales de refrigeración de cada escenario

Escenario	Consumo refrigeración (kWh/año)	Ahorro
1	2143,1	Ref.
2	1091,1	49,1 %
3-1	1133,7	47,1 %
3-2	792,2	63,0 %
4-1	1293,3	39,7 %
4-2	550,3	74,3 %

Figura 8.28: Consumo de refrigeración en los distintos escenarios

En este caso el mayor consumo, con un valor de 2143,1 kWh/año, tiene lugar en el Escenario 1, que emplea una bomba de calor aire-aire con un acristalamiento laminar sin cámara (SGG Stadip Clear 44.1).

Para el Escenario 2, se obtiene un ahorro del 49,1 % respecto al vidrio laminar sin cámara de referencia del Escenario 1, debido al uso de una bomba de calor aire-agua que se alimenta a partir del intercambiador geotérmico. Este ahorro, al igual que ocurre en el caso de los consumos de calefacción, se debe a la considerable diferencia de temperaturas entre el aire y el agua alimentada a la bomba de calor en los Escenarios 1 y 2, junto con la mayor eficiencia de la bomba de calor aire-agua utilizada.

Por otro lado, el empleo del vidrio doble claro con cámara en el Escenario 3-1 da lugar a un ahorro del 47,1 % en la energía consumida, ligeramente inferior al ahorro del 49,1 % obtenido en el Escenario 2. Esto sugiere que el vidrio claro doble deja pasar un nivel de radiación solar parecido al del vidrio laminar sin cámara, pero la menor conductancia térmica (U) ofrecida por dicha cámara se opone a la transferencia de energía hacia el exterior cuando se supera la temperatura de confort.

En el caso del Escenario 3-2, los vidrios dobles de control solar utilizados limitan la entrada de radiación solar incidente con su reducido factor solar ($g=0,41$), y consiguen un ahorro del 63,0 % frente al Escenario 1.

En cuanto a los vidrios activos, su control asociado al sistema de acondicionamiento en el caso del Escenario 4-1 da lugar a un consumo anual 1293,3 kWh/año, lo que genera un ahorro del 39,7 % frente al Escenario 1 de referencia, pero supone un sobrecoste con respecto a los Escenarios 2, 3-1 y 3-2. Este ahorro contrasta con los 550,3 kWh/año consumidos en el Escenario 4-2 donde el vidrio activo está equipado con un sistema de control automático, y que suponen una disminución del 74,3 % respecto al escenario de referencia. Esta reducción se debe a que, en el Escenario 4-1, la bomba de calor es alimentada obligatoriamente por el agua que sale del vidrio, lo que resulta contraproducente en condiciones de demanda de refrigeración, al encontrarse esta a mayor temperatura que la que proviene del intercambiador geotérmico empleado en el Escenario 4-2.

Por otro lado, en ambos escenarios 4-1 y 4-2, la circulación del agua da lugar a un apantallamiento solar equivalente al empleo de vidrio de control solar ($g=0,41$), al mismo tiempo que la alta conductividad térmica de la cámara de agua favorece la disipación de la energía captada frente a la cámara de aire.

8.2.3. Consumos totales

Además de los consumos de calefacción y refrigeración vistos en los apartados anteriores, existen otros derivados de los sistemas de ventilación, necesaria para mantener las condiciones requeridas de humedad, y los sistemas de bombeo. Los consumos totales de cada escenario se muestran en la Tabla 8.13 y se representan en la Figura 8.29.

Tabla 8.13: Consumos anuales desglosados de cada escenario

Escenario	Calefacción (kWh/año)	Refrigeración (kWh/año)	Ventilación (kWh/año)	Bombeo (kWh/año)	Total (kWh/año)
1	2335,9	2143,1	439,0	0	4917,9
2	867,5	1091,1	1383,1	163,9	3505,7
3-1	708,6	1133,7	1411,0	153,5	3406,7
3-2	795,8	792,2	1480,6	134,9	3203,5
4-1	863,5	1293,3	693,8	317,1	3167,7
4-2	597,8	550,3	915,8	292,0	2356,0

Figura 8.29: Consumos totales en los distintos escenarios

Tabla 8.14: Consumos totales y ahorros según distintas referencias

Escenario	Consumo Total (kWh/año)	Ahorro			
		Ref. Esc 1	Ref. Esc 2	Ref. Esc 3-1	Ref. Esc 3-2
1	4917,9	—	—	—	—
2	3505,7	29 %	—	—	—
3-1	3406,7	31 %	3 %	—	—
3-2	3203,5	35 %	9 %	6 %	—
4-1	3167,7	35 %	10 %	7 %	1 %
4-2	2356,0	52 %	33 %	31 %	27 %

Considerando los consumos totales de la Tabla 8.14 puede verse como el cambio de la bomba de calor actual (Escenario 1) a una bomba de calor aire-agua (Escenario 2) genera por sí solo unos ahorros energéticos totales del 29 %. Llama la atención que el empleo de un vidrio con cámara 6/8/6 (Escenario 3-1) ofrece solo un ahorro total del 3 % frente al uso de un vidrio laminar (Escenario 2). Por el contrario, el empleo de un vidrio de control solar con la misma configuración (Escenario 3-2) da lugar a un ahorro del 6 % frente al vidrio claro con cámara (Escenario 3-1).

Respecto a los vidrios activos, cuando su funcionamiento está asociado al sistema de acondicionamiento (Escenario 4-1), y por tanto no existe posibilidad de acumular agua para su posterior uso (Figura 8.22), se alcanzan ahorros del 10 % frente al vidrio laminar (Escenario 2) y del 7 % frente al vidrio doble claro (Escenario 3-1) respectivamente. No obstante, el Escenario 4-1 da lugar a un consumo similar al del vidrio doble de control solar (Escenario 3-2). Esto se debe a la penalización que sufre el consumo en condiciones de refrigeración como consecuencia de alimentar la bomba de calor con la corriente que proviene del acristalamiento activo, al no disponer de un sistema de control que permita alternar entre esta corriente y la que proviene del intercambiador geotérmico.

En contraste con lo anterior, el Escenario 4-2 emplea el vidrio activo gestionado por el sistema de control automático. En este escenario se generan ahorros totales mayores que en el resto de escenarios en los que se usa la bomba de calor agua-aire. Así, la configuración empleada en este escenario da lugar a un ahorro en el consumo energético del 33 % respecto al vidrio laminar (Escenario 2), del 31 % respecto al empleo del vidrio doble con cámara (Escenario 3-1) y del 27 % frente al vidrio doble de control solar usado en el Escenario 3-2.

Es necesario señalar también que el efecto del controlador sobre el vidrio activo permite alcanzar al Escenario 4-2 unos ahorros del 31 % en calefacción, del 57 % en refrigeración, y del 26 % en el consumo total, frente al Escenario 4-1.

Estos resultados se deben fundamentalmente a los efectos ya comentados de la sinergia entre la bomba de calor y el acristalamiento activo en condiciones de demanda de calefacción, así como a la disminución de las cargas solares debido al efecto atenuador y disipador de la cámara de agua en circulación.

8.2.4. Emisiones de dióxido de carbono de los escenarios

Al ser el dióxido de carbono (CO_2) uno de los indicadores considerados para determinar la evaluación energética de los edificios en la Directiva de eficiencia energética de edificios [7], se ha optado por detallar en la Tabla 8.15 las emisiones totales de este gas correspondientes a cada escenario, junto con la reducción que se consigue en cada uno de ellos con respecto a la situación de partida del taller (Escenario 1), que se toma como referencia.

Tabla 8.15: Emisiones de dióxido de carbono de los escenarios simulados

Escenario	Emisiones totales CO_2 (kg)	Reducción Emisiones	Emisiones superficiales CO_2 (kg/m ²)
1	1756	Referencia	45,02
2	1252	28,7 %	32,09
3-1	1216	30,7 %	31,18
3-2	1144	34,9 %	29,32
4-1	1131	35,6 %	29,00
4-2	841	52,1 %	21,57

Las máximas reducciones de emisiones de CO_2 respecto al escenario de referencia se corresponden con el vidrio activo con control automático (52,1 %) empleado en el Escenario 4-2, seguido del vidrio activo sin control (35,6 %) del Escenario 4-1. En cuanto a las emisiones superficiales de dichos vidrios, son de 21,57 kg CO_2/m^2 y 29,00 kg CO_2/m^2 respectivamente.

Un estudio de emisiones más completo a lo largo de la vida útil del edificio requeriría un análisis del ciclo de vida de los distintos vidrios empleados. Debe hacerse hincapié, además, en que estos resultados son válidos únicamente para el edificio considerado, con las superficies acristaladas indicadas en la Tabla 7.8, y bajo las condiciones climáticas estudiadas, ya que ambas variables ejercen una gran influencia sobre las fachadas adaptativas, tal y como han puesto de relieve Favoino, Jin y Overend [168].

8.2.5. Comparación de las diferentes evaluaciones económicas de los escenarios simulados

En lo que se refiere a las evaluaciones económicas de los escenarios simulados, la Tabla 8.16, presenta una comparación entre ellas. Una comparación de los valores expuestos revela como el coste de la renovación correspondiente al Escenario 2 es el más reducido, aunque este escenario también da lugar al menor ahorro energético anual. Por el contrario, el mayor ahorro anual generado es de 2561,85 kWh/año, y se obtiene en el Escenario 4-2, correspondiente al vidrio activo equipado con el sistema de control automático. Sin embargo este escenario es también el más costoso, requiriendo una inversión inicial de 33.154,75 €. Es interesante destacar que el empleo de vidrios de control solar (Escenario 3-2) proporciona un ahorro anual de 2474,83 kWh/año, muy similar a los 2561,85 kWh/año obtenidos en el caso del Escenario 4-1, donde se utiliza el vidrio activo con cámara de agua sin el control automático, con una reducción del 48 % en la inversión necesaria frente a este último.

Tabla 8.16: Consumos anuales e inversión necesaria para cada escenario

Escenario	Ahorro energía (kWh/año)	Inversión necesaria (€)
1	Ref.	0
2	1412,28	15.503,91
3-1	1511,18	17.350,31
3-2	1714,44	20.163,36
4-1	1750,21	26.135,03
4-2	2561,95	33.154,75

Respecto a la rentabilidad de la renovación del taller, el Escenario 3-2 da lugar al mayor valor para el Valor Actual Neto (VAN) que asciende a 35.121,07 €, junto con la mayor Tasa Interna de

Retorno (TIR), que alcanza el 8 %, y el menor Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) que es de 16,7 años, según puede verse en la Tabla 8.17.

No obstante, es necesario señalar que los resultados obtenidos para los Escenarios 4-1 y 4-2 no incluyen potenciales ahorros derivados del uso de estrategias de enfriamiento gratuito al no estar operativo el controlador fuera del horario docente considerado (8-22h). Por otra parte, en el Escenario 4-2 podrían obtenerse mayores ahorros empleando técnicas de control con un mayor nivel de complejidad que exceden el alcance de este trabajo de investigación. Adicionalmente, el agua generada por el vidrio activo en condiciones de demanda de refrigeración también podría emplearse para el precalentamiento de ACS o en la regeneración térmica del terreno, lo que podría repercutir en mayores ahorros.

Tabla 8.17: Evaluación económica de los escenarios simulados

Escenario	VAN	TIR	PRI (años)
2	16.044,52 €	6 %	19,3
3-1	16.407,49 €	6 %	19,7
3-2	35.121,07 €	8 %	16,7
4-1	12.936,32 €	4 %	22,1
4-2	24.075,82 €	5 %	21,7

Tabla 8.18: Parámetros supuestos en la evaluación económica

Coste electricidad (€/kWh)	0,23 ¹
Incremento anual coste electricidad (%)	10
Tipo de interés (%)	2
Vida útil instalación (años)	30

Los valores del VAN y la TIR para cada escenario se han obtenido a partir de los parámetros indicados en la Tabla 8.18, que deben entenderse como una estimación orientativa del coste de la renovación del taller para cada escenario planteado, y dependen en gran medida de variables difíciles de evaluar a priori para el periodo de 30 años considerado, tales como el incremento del precio de la energía eléctrica o el tipo de interés.

¹Estimado a partir de la página web de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, <http://facturaluz.cnmc.es>

Por último, debe tenerse en cuenta que la evaluación económica expuesta constituye una primera aproximación a la rentabilidad de los escenarios planteados. Una evaluación más detallada de los escenarios descritos requeriría un estudio de mayor amplitud que incluyera, entre otros, un análisis de costes del ciclo de vida [263] de las distintas configuraciones de acristalamientos planteadas en cada escenario.

8.3. Conclusiones acerca de la discusión de resultados

8.3.1. Conclusiones sobre los resultados experimentales

El controlador, mediante la variación del caudal de agua que circula a través de la cámara, puede optimizar el modo de funcionamiento del sistema influyendo sobre la temperatura interior de los módulos. Esta influencia depende de variables como la radiación solar incidente, la temperatura interior del módulo, la temperatura ambiente, o la temperatura y el caudal del agua que circula a través de la cámara.

8.3.2. Conclusiones sobre los resultados de simulación

A partir de los resultados obtenidos puede afirmarse que es posible evaluar el efecto del empleo de agua a cierta temperatura sobre la temperatura ambiente, obtenida mediante un acristalamiento activo, para alimentar una bomba de calor. Los resultados de simulación indican que es posible reproducir en TRNSYS estrategias de control para el vidrio activo basadas en más de una comparación de variables y similares a las empleadas en los ensayos experimentales, lo que permite llevar a cabo una primera aproximación del efecto del empleo de los vidrios activos con agua en circulación en edificios con diferentes configuraciones y bajo distintos condicionantes climáticos.

Además, se pone de relieve como los acristalamientos activos con agua en circulación, dotados con un sistema de control automático, son capaces de reducir notablemente tanto la demanda como el consumo energético del edificio estudiado, reduciendo sus emisiones contaminantes de gases de efecto invernadero. Específicamente, este tipo de acristalamientos permite una reducción del consumo del 31 % frente a un vidrio doble con cámara (6/8/6), y del 27 % frente a un vidrio doble de control solar (6/8/6). Esto se debe esencialmente al aprovechamiento del agua que circula a través del vidrio para alimentar la bomba de calor aire-agua en condiciones de demanda de calefacción, y al papel

atenuante de la cámara de agua en circulación sobre las cargas solares en condiciones de demanda de refrigeración.

Por otro lado, el empleo del controlador en el vidrio activo da lugar a una reducción en el consumo del 26 % frente a una unidad de vidrio activo cuyo que opera continuamente cuando entra en funcionamiento el sistema de acondicionamiento asociado a ella.

Así, dichos acristalamientos activos, podrían llegar a constituir una alternativa a los sistemas basados en colectores solares e intercambiadores geotérmicos en condiciones de demanda de calefacción, bajo ciertas condiciones de operación

8.3.3. Conclusiones sobre los resultados de la evaluación económica de los escenarios simulados

A partir de los resultados obtenidos puede afirmar que la opción de rehabilitación más rentable para el edificio estudiado consiste en el empleo de vidrios estáticos de control solar (Escenario 3-2). No obstante, la utilización de un vidrio activo con cámara de agua en circulación controlado automáticamente (Escenario 4-2) da lugar a la segunda mayor rentabilidad de las alternativas planteadas. La rentabilidad de este Escenario 4-2 podría, además, verse incrementada si se tienen en cuenta los potenciales ahorros derivados de estrategias control basadas en el enfriamiento nocturno gratuito, el precalentamiento de ACS o la regeneración geotérmica, que podrían llevarse a cabo en condiciones de demanda de refrigeración, y que no se han considerado en el análisis económico realizado.

Conclusiones

*Now this is not the end. It is not even the beginning of the end.
But it is, perhaps, the end of the beginning.*

Winston Churchill

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas a partir de cada uno de los capítulos anteriores.

9.1. Conclusiones generales

Es posible construir un sistema de control domótico basado en Arduino que permita monitorizar y controlar un acristalamiento activo con agua en circulación, y que optimice su funcionamiento.

Este funcionamiento óptimo del vidrio activo se obtiene cuando es gestionado mediante un sistema de control que lleva a cabo su monitorización continua.

9.2. Conclusiones arquitectónicas

Al favorecer la integración de los sistemas de vidrio activo, optimizando su funcionamiento, se amplía la libertad de diseño del arquitecto a la hora de proyectar arquitectura transparente eficiente.

El empleo del controlador propuesto permite optimizar el funcionamiento de la fachada en cada instante, haciendo uso de un sistema programable y fácilmente ampliable que permite aplicar diferentes estrategias de control en los edificios.

El controlador desarrollado puede interconectarse con otros elementos de acondicionamiento térmico mediante protocolos de comunicación estándar.

9.3. Conclusiones relacionadas con los EECN

El empleo de vidrios activos con agua en circulación instalados en un edificio con la tipología indicada situado en Madrid, y gestionados mediante un sistema de control, puede dar lugar a ahorros del 31 % frente a un vidrio doble claro (6/8/6), y del 27 % frente un vidrio doble de control solar (6/8/6).

La combinación del vidrio activo con una bomba de calor permite incrementar la eficiencia energética global de la instalación, reduciendo el consumo energético del edificio, así como sus emisiones contaminantes de gases de efecto invernadero.

El empleo del controlador en la gestión del vidrio activo permite reducir su consumo energético en un 26 % frente al vidrio activo sin control.

9.4. Conclusiones tecnológicas

Los vidrios activos con una sola cámara permiten reducir las cargas solares en condiciones de demanda de refrigeración, y son capaces de captar energía solar que puede ser empleada posteriormente con un cierto desfase temporal.

No obstante, los vidrios activos con una sola cámara no son apropiados para emplearse como elementos acondicionadores, ya que parte de la energía contenida en el agua es cedida hacia el ambiente exterior, desaprovechándose su uso.

9.5. Conclusiones industriales

Se ha puesto a punto un sistema de control fácil de implementar a bajo coste, de código y especificaciones abiertas, y adaptado al vidrio activo, cuya patente española de invención se ha concedido por parte de la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM).

9.6. Conclusiones de simulación

Es posible simular en TRNSYS el comportamiento de vidrios activos con agua en circulación que cambian sus propiedades (U y g) a lo largo de una simulación dada. Para ello se desdobra el efecto del vidrio activo en la acción conjunta de un vidrio estático de control solar y con un colector solar térmico.

Al emplear elementos activos y de control en la simulación, se ha observado que la elección del paso de tiempo (*timestep*) tiene una gran influencia en los resultados obtenidos.

9.7. Conclusiones económicas

La opción de rehabilitación más rentable para el edificio estudiado consiste en el empleo de vidrios estáticos de control solar (Escenario 3-2). No obstante, la rentabilidad del vidrio activo con cámara de agua en circulación controlado automáticamente (Escenario 4-2) podría verse incrementada si se tienen en cuenta los potenciales ahorros derivados de estrategias basadas en el enfriamiento nocturno gratuito, el precalentamiento de ACS, o la regeneración geotérmica, que podrían llevarse a cabo en condiciones de demanda de refrigeración, y que no se han considerado en el análisis económico realizado.

10

Conclusions

*Now this is not the end. It is not even the beginning of the end.
But it is, perhaps, the end of the beginning.*

Winston Churchill

In this chapter the conclusions gained along the previous chapters are gathered.

10.1. General conclusions

It is possible to build a home automation control system based on Arduino platform. This system is able to monitor and to control an active water-flow glazing and to optimise its behaviour.

The optimal working mode of the water-flow glazing is achieved when it is managed by a control system which lets its continuous supervision.

10.2. Architectural conclusions

By supporting the architectural integration of the water-flow glazing, optimising their behaviour, the architect's freedom for transparent and energy efficient architecture design is widened.

The controller lets the optimisation of the active façade in every moment, and it is an easily programmable and easily upgradeable system which lets to apply different control strategies in buildings.

The developed controller is able to connect with others conditioning systems by means of standard communication protocols.

10.3. Conclusions related to NZEB

In a climate zone as Madrid, when using active water-flow glazings managed by a control system in the studied building, energy savings of 31 % against a double clear glazing (6/8/6) and of 27 % against a solar control glazing (6/8/6) can be reached.

The combined use of an active glazing and a heat pump leads to an improvement of the energy efficiency of the facility, and reducing the greenhouse gas emissions.

The use of a controlled water-flow glazing leads to energy savings of 26 % when compared to a non controlled water-flow glazing.

10.4. Technological conclusions

Active water-flow glazings with a single chamber are able to reduce solar loads in cold demand conditions. However, they should not be used as conditioning elements since a part of the water energy is wasted flowing to the external ambient.

Active water-flow glazings with a single chamber are able to act solar energy gainers. The gained energy can be used later with a certain time lag.

10.5. Industrial conclusions

An easy to implement, low cost, open-source hardware based and fitted to active water-flow glazings control system, which has been patented in Spain, has been tuned up.

10.6. Simulation Conclusions

It is possible to simulate the behaviour of water-flow glazings, with U and g changing values within a simulation, in TRNSYS.

It is possible to emulate the behaviour of an active water-flow glazing by the combined action of a solar control glazing and a thermal solar collector.

Due to the use of active elements and controllers within the simulation, the choice of the *timestep* has a considerable influence on the results.

10.7. Economical conclusions

The most profitable renovation option for the studied building is to use solar control glazings (Scenario 3-2). However, the use is the second most profitable option. The profitability of the automatically controlled water-flow glazing (Scenario 4-2) could be increased by considering some additional

control strategies as nocturnal free-cooling, domestic heat water (DHW) pre-heating and geothermal borehole regeneration, which have not been taken into account in the performed economical analysis.

Futuras líneas de investigación

Cada nuevo comienzo proviene del fin de un comienzo anterior.

Séneca

A continuación se presentan algunas de las posibles líneas de investigación que han surgido a partir de la elaboración del presente trabajo de investigación.

A lo largo del desarrollo de esta tesis han surgido nuevos aspectos de interés que, por diferentes motivos, han quedado fuera de su alcance. A continuación se exponen algunos de ellos:

1. En este trabajo se han identificado diversos dispositivos de comunicación para la plataforma Arduino que hacen uso de los distintos estándares disponibles. Sería de interés profundizar en el estudio de la integración del sistema control propuesto con un sistema domótico centralizado de un edificio mediante estos estándares.
2. Con idea de aprovechar la sinergia entre la energía solar térmica y fotovoltaica se plantea la integración del sistema de acristalamiento activo con cámara de agua circulante con un panel fotovoltaico, de manera que se redujera la temperatura de funcionamiento de los módulos fotovoltaicos mejorando su eficiencia.
3. Dados los resultados obtenidos para los vidrios activos con una sola cámara de agua en circulación, sería de interés desarrollar e implementar el modelo detallado de un vidrio activo triple, con una cámara de agua en circulación y una de aire, en un software de simulación energética de edificios. Esto daría lugar a herramientas que permitirían la simulación detallada de edificios equipados con este tipo de acristalamientos, y que podrían validarse experimentalmente en edificios a escala real.
4. En este trabajo se han considerado unos volúmenes de almacenamiento de agua basados en los experimentos realizados con los módulos a escala. Sería de interés el estudio de la influencia del volumen de agua acumulada para su posterior optimización.
5. A pesar de que el presente trabajo se han empleado estrategias básicas de control, el controlador programable permite el empleo de estrategias de control avanzadas (control PID, control borroso, control adaptativo, control predictivo, etc.) así como su integración con distintos sistemas de acondicionamiento. Esto permitiría emplear estrategias optimizadas de operación, como optimizar el rendimiento de cada fachada de vidrio activo según su orientación.
6. Aunque en este trabajo el papel del controlador se ha limitado al control térmico de la instalación, su uso puede extenderse a diferentes áreas relacionadas con la seguridad de funcionamiento, como la detección de fallos y gestión de alarmas, entre otras, lo que da lugar a nuevas líneas de investigación.

Referencias bibliográficas

- [1] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., y Pout, C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3):394 – 398, 2008. ISSN 0378-7788.
- [2] IDAE. Página Web Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE) - <http://www.idae.es>, 2016.
- [3] IDAE. *Plan nacional de ahorro y eficiencia energética 2011-2020*. IDAE, 2011.
- [4] *World Energy Outlook 2012*. International Energy Agency, 2012.
- [5] Comisión Europea. Directiva 93/76CEE relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética (SAVE), 1993.
- [6] Comisión Europea. *Directiva 2002/91 CE relativa a Eficiencia energética de los edificios*. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 2002.
- [7] Comisión Europea. *Directiva 2010/31 UE relativa a Eficiencia Energética de los Edificios (refundición)*. Diario Oficial de la Unión Europea, 2010.
- [8] Acuerdo de París (COP21) - https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es, 2015.
- [9] Comisión Europea. Marco sobre clima y energía para 2030 - https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es, 2013.
- [10] Laski, J. y Burrows, V. From Thousands to Billions - Coordinated Action towards 100 % Net Zero Carbon Buildings By 2050 - World Green Building Council, 2017.

- [11] Diario web El Confidencial - https://www.elconfidencial.com/cultura/2017-02-23/casa-farnsworth-mies-van-der-rohe_1336255, 2017.
- [12] The Glass House, W. <http://theglasshouse.org/>, 2017.
- [13] De La Hoz, R. <http://www.rafaeldelahoz.com/es/>, 2017.
- [14] Blog Play and tour -. <http://blog.playandtour.com>, 2017.
- [15] Foster and Partners, <http://www.fosterandpartners.com>, 2015.
- [16] Bigapplesecrets. <http://www.bigapplesecrets.com>, 2017.
- [17] Dounis, A. I. y Caraiscos, C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:1246–1261, 2009.
- [18] Balaras, C., Droutsas, K., Argiriou, D., y Asimakopoulos, D. Potential for energy conservation in apartment buildings. *Energy and Buildings*, 31:143–154, 2000.
- [19] Tsikaloudaki, K., Theodosiou, T., Laskos, K., y Bikas, D. Assessing cooling energy performance of windows for residential buildings in the mediterranean zone. *Energy Conversion and Management*, 64(0):335 – 343, 2012. ISSN 0196-8904. 2011, The International Renewable Energy Congress.
- [20] Kim, J. T. y Todorovic, M. S. Tuning control of buildings glazing's transmittance dependence on the solar radiation wavelength to optimize daylighting and building's energy efficiency. *Energy and Buildings*, 63(0):108 – 118, 2013. ISSN 0378-7788.
- [21] Gustavsen, A., Jelle, B. P., Arasteh, D., y Kohler, C. State-of-the-art highly insulating window frames - research and market review. Informe técnico, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), 2007.
- [22] Arasteh, D., Curcija, C., Huang, J., Huizenga, C., y Kohler, C. Evaluating Fenestration Products for Zero-Energy Buildings: Issues for discussion. Informe técnico, 2006.
- [23] Comisión Europea - Portal del participante. FP7 - Energy-efficient buildings - Call for proposals - 2013, 2012.
- [24] Marszal, A., Heiselberg, P., Bourrelle, J., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., y Napolitano, A. Zero energy building: A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(Issue 4):971–979, April 2011.
- [25] Passivhaus Institute (PHI). Passivhaus Institute (PHI).

- [26] BPIE. *Europe's building under the microscope*. BPIE, 2011. ISBN 9789491143014.
- [27] Gobierno de España, Ministerio de la Presidencia y para las Administraciones Territoriales. Real Decreto 564/2017, de 2 de junio, por el que se modifica el Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios, 2017.
- [28] Gobierno de España. Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios, 2013.
- [29] Comisión Europea. Recomendación (UE) 2016/1318 de la Comisión de 29 de julio de 2016 sobre las directrices para promover los edificios de consumo de energía casi nulo y las mejores prácticas para garantizar que antes de que finalice 2020 todos los edificios nuevos sean edificios de consumo de energía casi nulo, 2016.
- [30] Hermelink, A., Schimschar, S., Boermans, T., Pagliano, L., Zangheri, P., Armani, R., Voss, K., y Musall, E. Towards nearly zero-energy buildings - Definition of common principles under the EPBD, 2012.
- [31] Evola, G., Margani, G., y Marletta, L. Cost-effective design solutions for low-rise residential net ZEBs in mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 68, Part A(0):7 – 18, 2014. ISSN 0378-7788.
- [32] Carrilho da Graça, G., Augusto, A., y Lerer, M. M. Solar powered net zero energy houses for southern Europe: Feasibility study. *Solar Energy*, 86:634–646, 2012.
- [33] Chwieduk, D. Towards sustainable-energy buildings. *Applied Energy*, 76(1–3):211 – 217, 2003. ISSN 0306-2619. Energex 2002 - Energy Policies and Economics and Rational Use of Energy of Energy Topics VI and VII.
- [34] Martinopoulos, G. y Tsalikis, G. Solar energy systems potential for nearly net zero energy residential buildings. *Solar Energy*, 115:743 – 756, 2015. ISSN 0038-092X.
- [35] Greek Government, Ministry of Environment, Energy and Climate Change. Law 3851/2010 - accelerating the development of Renewable Energy Sources to deal with climate change and other regulations addressing issues under the authority of the Ministry of Environment, Energy and Climate Change, 2010.
- [36] Hartkopf, V., Loftness, V., Mahdavi, A., Lee, S., y Shankavaram, J. An integrated approach to design and engineering of intelligent buildings - The Intelligent Workplace at Carnegie Mellon University. *Automation in Construction*, 6(5–6):401 – 415, 1997. ISSN 0926-5805.

- [37] Kolokotsa, D., Rovas, D., Kosmatopoulos, E., y Kalaitzakis, K. A roadmap towards intelligent net-zero- and positive-energy buildings. *Solar Energy*, 85:3067–3084, 2011.
- [38] Comisión Europea. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones - Estrategia de la UE relativa a la calefacción y la refrigeración-COM(2016) 51 final, 2016.
- [39] AENOR. Une-en 15232:2014 - Eficiencia energética de los edificios. Métodos de cálculo de las mejoras de la eficiencia energética mediante la aplicación de sistemas integrados de gestión técnica de edificios, 2008.
- [40] Wirth, U., Dierauer, T., y Winterer, F. Building automation – impact on energy efficiency Application per EN 15232 eu.bac product certification, 2010.
- [41] Giménez Molina, C. *Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos: los vidrios dinámicos*. Tesis doctoral, E.T.S. Arquitectura - Universidad Politécnica de Madrid, 2011.
- [42] Li, C. y Chow, T. T. Water-filled double reflective window and its year-round performance. *Procedia Environmental Sciences*, 11, Part B:1039 – 1047, 2011. ISSN 1878-0296. 2011 2nd International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering (CESCE 2011).
- [43] Gil-López, T. y Giménez-molina, C. Environmental, economic and energy analysis of double glazing with a circulating water chamber in residential buildings. *Applied Energy*, 101:572–581, 2013. ISSN 0306-2619.
- [44] Gil-López, T. y Giménez-Molina, C. Influence of double glazing with a circulating water chamber on the thermal energy savings in buildings. *Energy & Buildings*, 56:56–65, 2013. ISSN 0378-7788.
- [45] Millán Anglés, S. y Lauret Aguirregabiria, B. Research and analysis about smart glazing with water circulation system in energy-efficient houses. First International conference on Construction and Building Research, 2009.
- [46] Ochoa, C. E. y Capeluto, I. G. Strategic decision-making for intelligent buildings: Comparative impact of passive design strategies and active features in a hot climate. *Building and Environment*, 43(11):1829 – 1839, 2008. ISSN 0360-1323.
- [47] Jelle, B. P., Hynd, A., Gustavsen, A., Arasteh, D., Goudey, H., y Hart, R. Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96(0):1 – 28, 2012. ISSN 0927-0248.

- [48] Quesada, G., Rousse, D., Dutil, Y., Badache, M., y Hallé, S. A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5):2820 – 2832, 2012. ISSN 1364-0321.
- [49] Baetens, R., Jelle, B. P., y Gustavsen, A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2):87 – 105, 2010. ISSN 0927-0248.
- [50] Dussault, J. M., Gosselin, L., y Galstian, T. Integration of smart windows into building design for reduction of yearly overall energy consumption and peak loads. *Solar Energy*, 86(11):3405 – 3416, 2012. ISSN 0038-092X.
- [51] Ramírez-Balas, C., Fernández-Nieto, E., Narbona-Reina, G., Sendra, J., y Suárez, R. Numerical simulation of the temperature evolution in a room with a mur neutralisant. Application to The City of Refuge by Le Corbusier. *Energy and Buildings*, 86(0):708 – 722, 2015. ISSN 0378-7788.
- [52] Zhang, X., Shen, J., Yan Lu, Y., He, W., Xu, P., Zhao, X., Qiu, Z., Zhu, Z., Zhou, J., y Dong, X. Active solar thermal facades (ASTFs): From concept, application to research questions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50:32 – 63, 2015. ISSN 1364-0321.
- [53] Quesada, G., Rousse, D., Dutil, Y., Badache, M., y Hallé, S. A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5):2643 – 2651, 2012. ISSN 1364-0321.
- [54] MIT Solar Decathlon Team. MIT Solar Decathlon Team Web, 2007.
- [55] Hestnes, A. G. Building integration of solar energy systems. *Solar Energy*, 67(4–6):181 – 187, 1999. ISSN 0038-092X.
- [56] Matuska, T. y Sourek, T. Façade solar collectors. *Solar Energy*, 80:1443–1452, 2006.
- [57] Zhang, Z., Sun, Z., y Duan, C. A new type of passive solar energy utilization technology - The wall implanted with heat pipes. *Energy and Buildings*, 84(0):111 – 116, 2014. ISSN 0378-7788.
- [58] Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., y Rubel, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3):259–263, 07 2006.
- [59] Ibrahim, M., Wurtz, E., Biwole, P., y Achard, P. Transferring the south solar energy to the north facade through embedded water pipes. *Energy*, 78(0):834 – 845, 2014. ISSN 0360-5442.
- [60] Ji, J., Luo, C., Chow, T., Sun, W., y He, W. Thermal characteristics of a building-integrated dual-fuction solar collector in water heating mode with natural circulation. *Energy*, 36:566–574, 2011.

- [61] Rockendorf, G., Janssen, S., y Felten, H. Transparently insulated hybrid wall. *Solar Energy*, 58:33–38, 1996.
- [62] Platzer, W. Development of a glass facade with internal fluid flow. En *Glass processing days*, 2005.
- [63] Platzer, W. Steps toward a vision - a multifunctional fluidised glass facade. En *Glass Development in the Middle East - An IBIME 2005 presentation*, 2005.
- [64] Chow, T. T., Li, C., y Lin, Z. Innovative solar windows for cooling-demand climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2):212 – 220, 2010. ISSN 0927-0248.
- [65] Chow, T. T., Li, C., y Lin, Z. The function of solar absorbing window as a water-heating device. *Building And Environment*, 46:955–960, 2011.
- [66] Young, C. H., Chen, Y. L., y Chen, P. C. Heat insulation solar glass and application on energy efficiency buildings. *Energy and Buildings*, 78(0):66 – 78, 2014. ISSN 0378-7788.
- [67] Cuce, E., Young, C. H., y Riffat, S. B. Performance investigation of heat insulation solar glass for low-carbon buildings. *Energy Conversion and Management*, 88(0):834 – 841, 2014. ISSN 0196-8904.
- [68] Cuce, E., Young, C. H., y Riffat, S. B. Thermal performance investigation of heat insulation solar glass: A comparative experimental study. *Energy and Buildings*, 86(0):595 – 600, 2015. ISSN 0378-7788.
- [69] Rheault, S. y Bilgen, E. Experimental study of full-size automated venetian blind windows. *Solar Energy*, 44(3):157–160, 1990.
- [70] Tzempelikos, A. y Athienitis, A. K. The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand. *Solar Energy*, 81(3):369 – 382, 2007. ISSN 0038-092X.
- [71] Kim, J. H., Park, Y. J., Yeo, M. S., y Kim, K. W. An experimental study on the environmental performance of the automated blind in summer. *Building and Environment*, 44(7):1517 – 1527, 2009. ISSN 0360-1323. The 6th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation & Energy Conservation in Buildings (IAQVEC 2007), Sendai, Japan, 28-31 October, 2007.
- [72] Corgnati, S. P., Perino, M., y Serra, V. Experimental assessment of the performance of an active transparent façade during actual operating conditions. *Solar Energy*, 81(8):993–1013, 2007.
- [73] Lollini, R., Danza, L., y Meroni, I. Energy efficiency of a dynamic glazing system. *Solar Energy*, 84(4):526 – 537, 2010. ISSN 0038-092X. International Conference CISBAT 2007.

- [74] Liu, M., Wittchen, K. B., y Heiselberg, P. K. Control strategies for intelligent glazed façade and their influence on energy and comfort performance of office buildings in Denmark. *Applied Energy*, 145(0):43 – 51, 2015. ISSN 0306-2619.
- [75] Lai, C. M. y Hokoi, S. Solar façades: A review. *Building and Environment*, 91:152 – 165, 2015. ISSN 0360-1323. Fifty Year Anniversary for Building and Environment.
- [76] O'Hegarty, R., Kinnane, O., y McCormack, S. J. Review and analysis of solar thermal facades. *Solar Energy*, 135:408 – 422, 2016. ISSN 0038-092X.
- [77] Gartner, J. Patente - Integrated aluminum façade and process for its production, Patente núm. ep 0289598 a1, 1988. EP Patent App. EP19,880,900,687.
- [78] Gong, X. y Claridge, D. Study of mullion heating and cooling system of intelligent workplace at carnegie mellon university, 2006.
- [79] Hydronic Heating/Cooling Of The Intelligent Workplace - Carnegie Mellon University, 2015.
- [80] Johnson Inc. Johnson Metasys Server, 2015.
- [81] Siemens Industry Inc. Siemens Apogee Server, 2015.
- [82] Li, C. *Performance evaluation of water-flow window glazing*. Tesis doctoral, University of Hong Kong, 2012.
- [83] Hatton, B. D., Wheeldon, I., Hancock, M. J., Kolle, M., Aizenberg, J., y Ingber, D. E. An artificial vasculature for adaptive thermal control of windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 117(0):429 – 436, 2013. ISSN 0927-0248.
- [84] Carbonnier, E. y La Roche, P. Fluidized building envelopes, an integrated approach to passive cooling and heating. En *Practical Sustainability Symposium Proceedings of the 1st Symposium of Simpson Gumpertz & Heger Inc. and California State Polytechnic University, Pomona*, 2010.
- [85] Pérez-Pujazón Millán, B. *La implementación arquitectónica de los acristalamientos activos con agua circulante, y su contribución en edificios de consumo de energía casi nulo*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [86] Chow, T. T., Li, C., y Clarke, J. A. Numerical prediction of water-flow glazing performance with reflective coating. En *12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2011.
- [87] Chow, T. T., Li, C., y Lin, Z. Thermal characteristics of water-flow double pane window. *International Journal of Thermal Sciences*, 50:140–148, 2011.

- [88] Chow, T. T. y Li, C. Liquid-filled solar glazing design for buoyant water-flow. *Building and Environment*, 60(0):45–55, 2013. ISSN 0360-1323.
- [89] Proyecto COST-EFFECTIVE - Convert facades into multifunctional, energy gaining components - <http://www.cost-effective-renewables.eu>, 2012.
- [90] Maurer, C., Gasnier, D., Pflug, T., Plešec, P., Hafner, J., Jordan, S., y Kuhn, T. E. First measurement results of a pilot building with transparent façade collectors. *Energy Procedia*, 48:1385 – 1392, 2014. ISSN 1876-6102. Proceedings of the 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013).
- [91] Gohl, N., Loose, A., Stark, S., y Drück, H. Development of multifunctional building components (MultiKomp) – comparison of different concepts. *Energy Procedia*, 48:1365 – 1373, 2014. ISSN 1876-6102. Proceedings of the 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013).
- [92] Proyecto FLUIDGLASS - Solar Thermal Glass Facades with Adjustable Transparency - <http://www.fluidglass.eu>, 2013.
- [93] Stopper, J. Fluidglass Project. En *Die Zukunft des Bauens*, 2014.
- [94] Gstöhl, D., Stopper, J., Bertsch, S., y Schwarz, D. Fluidised glass façade elements for an active energy transmission control. En *World Engineer's Convention*, 2011.
- [95] Proyecto LAWIN - Large Fluidic Windows, <http://www.lawin.uni-jena.de/en/startpage/>, 2016.
- [96] Proyecto SINGER - Cedint, <http://www.cedint.upm.es/es/proyecto/singer>, 2011.
- [97] Kalogirou, S. Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms. *Applied Energy*, 77(4):383–405, 2004. ISSN 03062619.
- [98] Duffie, J. A. y Beckman, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, 3ª edición, 2006. ISBN 0471698679.
- [99] Barber, D. *A Second Modernism: MIT, Architecture and the Techno-Social Moment*, chapter Experimental Dwellings: Modern Architecture and Environmental Research at the M.I.T. Solar Energy Fund, pages 252–285. Cambridge: MIT Press, 2013.
- [100] Whillier, A. *Solar energy collection and its utilization for house heating*. Tesis doctoral, Massachusetts Institute of Technology, 1953.
- [101] Kovarik, M. y Lesse, P. Optimal control of flow in low temperature solar heat collector. *Solar Energy*, 18(5):431 – 435, 1976. ISSN 0038-092X.

- [102] Pontryagin, L. S., Boltyanskii, V. G., Gamkrelize, R. V., y Mishchenko, E. F. *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 1962.
- [103] Dorato, P. A review of the application of modern control theory to solar energy systems. En *18th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*, volume 2, pages 907–910, 1979.
- [104] Dorato, P. Optimal temperature control of solar energy systems. *Solar Energy*, 30(2):147 – 153, 1983. ISSN 0038-092X.
- [105] Winn, C. B. y Ellsworth Hull III, D. Optimal controllers of the second kind. *Solar Energy*, 23 (6):529 – 534, 1979. ISSN 0038-092X.
- [106] Orbach, A., Rorres, C., y Fischl, R. Optimal control of a solar collector loop using a distributed-lumped model. *Automatica*, 17(3):535 – 539, 1981. ISSN 0005-1098.
- [107] Fritchman, B. M. y Grantham, W. J. Optimal control of a bilinear solar collector/heat exchanger system. En *American Control Conference, 1982*, pages 1155–1157, 1982.
- [108] Fritchman, B. M. y Grantham, W. J. Differential game control of a bilinear solar collector/heat exchanger system. *Mathematical Modelling*, 8(0):399 – 405, 1987. ISSN 0270-0255.
- [109] Kotob, S., Salman, M., Ayyash, S., y Farhat, M. Low cost microprocessor based optimal controller for solar cooling systems. En *Decision and Control, 1983. The 22nd IEEE Conference on*, pages 958–963, 1983.
- [110] Kummert, M., André, P., y Nicolas, J. Optimal heating control in a passive solar commercial building. *Solar Energy*, 69, Supplement 6(0):103 – 116, 2001. ISSN 0038-092X. EUROSUN 2000 Selected Proceedings.
- [111] Badescu, V. Optimal control of flow in solar collector systems with fully mixed water storage tanks. *Energy Conversion and Management*, 49(2):169–184, 2008. ISSN 01968904.
- [112] Muralidhar, G., Nagaraju, J., y Mohan, S. A solar controller with a microprocessor based temperature monitor. En *Advances In Solar Energy Technology*, pages 2824 – 2828. Pergamon, Oxford, 1988. ISBN 978-0-08-034315-0.
- [113] Nhut, L. y Cheol Park, Y. A study on automatic optimal operation of a pump for solar domestic hot water system. *Solar Energy*, 98, Part C(0):448 – 457, 2013. ISSN 0038-092X.
- [114] Winn, C. Controls in solar energy systems. En B'oeer, K. W. y Duffie, J. A., editors, *Advances in Solar Energy*, pages 209–240. Springer New York, 1983. ISBN 978-1-4684-8994-1.

- [115] Johnson, G. A microprocessor based solar controller. En *Decision and Control including the 16th Symposium on Adaptive Processes and A Special Symposium on Fuzzy Set Theory and Applications, 1977 IEEE Conference on*, pages 336–340, 1977.
- [116] MOS 6502 Datasheet, MOS Technology Inc, 1976. Informe técnico, 1976.
- [117] Moen, R. Solar energy management system. En *including the 18th IEEE Conference on Decision and Control Symposium on Adaptive Processes*, volume 2, pages 917–919, 1979.
- [118] Tyuluman, S. A., Schroder, D., y Austin, M. E. A microprocessor-based system for the monitoring and control of a solar installation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, IECI-27(1):1–4, 1980.
- [119] Murray, T., Jones, W., y Smith, N. Software development for a solar energy system. *Microprocessors and Microsystems*, 4(4):129 – 135, 1980. ISSN 0141-9331.
- [120] Paton, B., Hughes, S., y Youle, G. 20 - Application Of Microcomputers For Solar Energy. En SWARTMAN, A. J., editor, *Solar Energy Conversion II*, pages 303 – 317. Pergamon, 1981. ISBN 978-0-08-025388-6.
- [121] Paton, B. 32-36 - Short Course In Microprocessors For Solar Energy Applications. En Dixon, A. y Leslie, J., editors, *Solar Energy Conversion*, pages 939 – 1004. Pergamon, 1979. ISBN 978-0-08-024744-1.
- [122] Waddington, T. Developing a microprocessor-based energy management controller. *Microprocessors and Microsystems*, 6(5):235 – 238, 1982. ISSN 0141-9331.
- [123] Santamouris, M. y Lefas, C. Design and control of hybrid solar houses using microcomputers. *Energy*, 11(7):709 – 716, 1986. ISSN 0360-5442.
- [124] Lefas, C. C. Microprocessor control of distributed storage, active solar heating systems : J. vol 10 no 2 (april 1987) pp 119–126. *Journal of Microcomputer Applications*, 10:119–126, 1987. ISSN 0141-9331.
- [125] Haghighat, F. y Singh, D. Improved control strategy for forced flow solar water heating systems. *Energy Conversion and Management*, 28(4):323 – 326, 1988. ISSN 0196-8904.
- [126] Muralidhar, G., Raju, J., y Mohan, S. Differential temperature controller: An energy conservative device for solar water heating systems. *Energy Conversion and Management*, 31(1):61 – 63, 1991. ISSN 0196-8904.
- [127] Dounis, A., Lefas, C., y Argiriou, A. Knowledge-based versus classical control for solar-building designs. *Applied Energy*, 50(4):281 – 292, 1995. ISSN 0306-2619.

- [128] Prud'Homme, T. y Gillet, D. Advanced control strategy of a solar domestic hot water system with a segmented auxiliary heater. *Energy and Buildings*, 33(5):463–475, 2001. ISSN 03787788.
- [129] Peter, M. y Drück, H. Testing of controllers for thermal solar systems. *Solar Energy*, 82(8): 676–685, 2008.
- [130] Nguyen, T. y Aiello, M. Energy intelligent buildings based on user activity: A survey. *Energy and Buildings*, 56:244–257, 2013.
- [131] Kicsiny, R. y Farkas, I. Improved differential control for solar heating systems. *Solar Energy*, 86(11):3489 – 3498, 2012. ISSN 0038-092X.
- [132] Buzás, J. y R. Kicsiny, R. Transfer functions of solar collectors for dynamical analysis and control design. *Renewable Energy*, 68(0):146 – 155, 2014. ISSN 0960-1481.
- [133] Kicsiny, R. Transfer functions of solar heating systems for dynamic analysis and control design. *Renewable Energy*, 77(0):64 – 78, 2015. ISSN 0960-1481.
- [134] Liu, H., Zhang, S., Jiang, Y., y Yao, Y. Feasibility study on a novel freeze protection strategy for solar heating systems in severely cold areas. *Solar Energy*, 112(0):144 – 153, 2015. ISSN 0038-092X.
- [135] Huang, B., Ton, W., Wu, C., Ko, H., Chang, H., Yen, R., y Wang, J. Maximum-power-point tracking control of solar heating system. *Solar Energy*, 86(11):3278–3287, 2012. ISSN 0038092X.
- [136] Levermore, G. *Building energy management systems - An application to heating and control*. Spon Press, 1992. ISBN 978-0419152903.
- [137] MacArthur, J., Palm, W., y Lessmann, R. Performance analysis and cost optimization of a solar-assisted heat pump system. *Solar Energy*, 21(1):1–9, 1978.
- [138] Sakamoto, M. Advanced control – control technology for residential airconditioners in japan. En *Heat Pumps for Energy Efficiency and Environmental Progress*, pages 191 – 200. Elsevier, Oxford, 1993. ISBN 978-0-444-81534-7.
- [139] Tassou, S., Marquand, C., y Wilson, D. Comparison of the performance of capacity controlled and conventional on/off controlled heat pumps. *Applied Energy*, 14(4):241 – 256, 1983. ISSN 0306-2619.
- [140] Mathews, E., Botha, C., Arndt, D., y Malan, A. HVAC control strategies to enhance comfort and minimise energy usage. *Energy and Buildings*, 33:856–863, 2001.

- [141] Boait, P. y Rylatt, R. A method for fully automatic operation of domestic heating. *Energy and Buildings*, 42:11–16, 2010.
- [142] Wood, G. y Newborough, M. Energy-use information transfer for intelligent homes: Enabling energy conservation with central and local displays. *Energy and Buildings*, 39:495–503, 2007.
- [143] Chua, K., Chou, S., Yang, W., y Yan, J. Achieving better energy-efficient air conditioning - a review of technologies and strategies. *Applied Energy*, 104:87 – 104, 2013. ISSN 0306-2619.
- [144] Hameed Shaikh, P., Bin Mohd Nor, N., Nallagownden, P., Elamvazuthi, I., y Ibrahim, T. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34(0):409 – 429, 2014. ISSN 1364-0321.
- [145] Sporn, P. y Ambrose, E. The heat pump and solar energy. En *The world symposium on applied solar energy, Phoenix, Arizona, USA*, 1955.
- [146] Sakai, I., Takagi, M., Terakawa, K., y Ohue, J. Solar space heating and cooling with bi-heat source heat pump and hot water supply system. *Solar Energy*, 18(6):525 – 532, 1976. ISSN 0038-092X.
- [147] Freeman, T., Mitchell, J., y Audit, T. Performance of combined solar-heat pump systems. *Solar Energy*, 22(2):125 – 135, 1979. ISSN 0038-092X.
- [148] Lorsch, H. G. Active solar heating and cooling systems: I. heat pump systems. *Energy and Buildings*, 3(2):115–136, 1981.
- [149] Klein, S.A. et al. *TRNSYS 17 - TRNEdit. Vol. 6*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA., 2012.
- [150] Kaygusuz, K. Performance of solar-assisted heat-pump systems. *Applied Energy*, 51(2):93–109, 1995.
- [151] Chaturvedi, S. K. y Shen, J. Y. Thermal performance of a direct expansion solar-assisted heat pump. *Solar Energy*, 33(2):155 – 162, 1984. ISSN 0038-092X.
- [152] Comakli, O., Kaygusuz, K., y Ayhan, T. Solar-assisted heat pump and energy storage for residential heating. *Solar Energy*, 51(5):357 – 366, 1993. ISSN 0038-092X.
- [153] Ito, S., Miura, N., y Wang, K. Performance of a heat pump using direct expansion solar collectors. *Solar Energy*, 65(3):189 – 196, 1999. ISSN 0038-092X.
- [154] Martinopoulos, G. y Tsalikis, G. Active solar heating systems for energy efficient buildings in greece: A technical economic and environmental evaluation. *Energy and Buildings*, 68, Part A (0):130 – 137, 2014. ISSN 0378-7788.

- [155] Huang, B. y Chyng, J. Performance characteristics of integral type solar-assisted heat pump. *Solar Energy*, 71(6):403 – 414, 2001. ISSN 0038-092X.
- [156] Cervantes, J. y Torres-Reyes, E. Experiments on a solar-assisted heat pump and an exergy analysis of the system. *Applied Thermal Engineering*, 22(12):1289 – 1297, 2002. ISSN 1359-4311.
- [157] Baek, N., Shin, U., y Yoon, J. A study on the design and analysis of a heat pump heating system using wastewater as a heat source. *Solar Energy*, 78(3):427 – 440, 2005. ISSN 0038-092X.
- [158] Meggers, H., F. and Hansjurg Leibundgut. The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump. *Energy and Buildings*, 43(4):879 – 886, 2011. ISSN 0378-7788.
- [159] Chaturvedi, S., Gagrani, V., y Abdel-Salam, T. Solar-assisted heat pump – a sustainable system for low-temperature water heating applications. *Energy Conversion and Management*, 77:550 – 557, 2014. ISSN 0196-8904.
- [160] Hepbasli, A. y Kalinci, Y. A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7):1211 – 1229, 2009. ISSN 1364-0321.
- [161] Amin, Z. M. y Hawlader, M. A review on solar assisted heat pump systems in Singapore. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26(0):286 – 293, 2013. ISSN 1364-0321.
- [162] Omojaro, P. y Breitskopf, C. Direct expansion solar assisted heat pumps: A review of applications and recent research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22:33 – 45, 2013. ISSN 1364-0321.
- [163] Hepbasli, A., Biyik, E., Ekren, O., Gunerhan, H., y Araz, M. A key review of wastewater source heat pump (WWSHP) systems. *Energy Conversion and Management*, 88:700 – 722, 2014. ISSN 0196-8904.
- [164] Kamel, R. S., Fung, S. A., y Dash, P. Solar systems and their integration with heat pumps: A review. *Energy and Buildings*, 87(0):395 – 412, 2015. ISSN 0378-7788.
- [165] van Paassen, A. *Digital Computer Applications to Process Control: Proceedings of the 6th IFAC/IFIP Conference, Düsseldorf, F. R. Germany, 14-17 October 1980*, chapter Energy conservation in an air conditioning installation through a microcomputer-based control system, pages 275–281. Elsevier Science, 2014. ISBN 9781483146492.
- [166] Loonen, R., Trčka, M., Cóstola, D., y Hensen, J. Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25(0):483 – 493, 2013. ISSN 1364-0321.

- [167] Favoino, F., Goia, F., Perino, M., y Valentina Serra, V. Experimental assessment of the energy performance of an advanced responsive multifunctional façade module. *Energy and Buildings*, 68, Part B:647 – 659, 2014. ISSN 0378-7788. The 2nd International Conference on Building Energy and Environment (COBEE), 2012, University of Colorado at Boulder, USA.
- [168] Favoino, F., Jin, Q., y Overend, M. Towards an ideal adaptive glazed façade for office buildings. *Energy Procedia*, 62:289 – 298, 2014. ISSN 1876-6102.
- [169] Wong, J., Li, H., y Wang, S. Intelligent building research: a review. *Automation in Construction*, 14(1):143 – 159, 2005. ISSN 0926-5805.
- [170] Kroner, W. M. An intelligent and responsive architecture. *Automation in Construction*, 6: 381–393, 1997.
- [171] Arkin, H. y Paciuk, M. Evaluating intelligent buildings according to level of service systems integration. *Automation in Construction*, 6:471–479, 1997.
- [172] Friedewald, M., Da Costa, O., Punie, Y., Alahuhta, Y., y Heinonen, S. Perspectives of ambient intelligence in the home environment. *Telematics and Informatics*, 22:221–238, 2005.
- [173] Sala, M. The intelligent envelope: the current state of the art. *Renewable energy*, 5(5): 1039–1046, 1994.
- [174] Sala, M. New facade technologies: AIW - Active Intelligent Window. *Renewable Energy*, 10 (2/3):185–190, 1997.
- [175] Atkins, B. *Intelligent Buildings*. Kogan Page Limited, ISBN 1-85091-683-7, first edición, 1988.
- [176] Wigginton, M. y Harris, J. *Intelligent Skins*. NetLibrary, Inc. Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 9780750648479.
- [177] Doukas, H., Patlitzianas, K., Iatropoulos, K., y Psarras, J. Intelligent building energy management system using rule sets. *Building and Environment*, 42(10):3562 – 3569, 2007. ISSN 0360-1323.
- [178] Karjalainen, S. y Koistinen, O. User problems with individual temperature control in offices. *Building And Environment*, 42:2880–2887, 2007.
- [179] Meier, A., Aragón, C., Peffer, T., Perry, D., y Pritoni, M. Usability of residential thermostats: Preliminary investigations. *Building and Environment*, 46(10):1891 – 1898, 2011. ISSN 0360-1323.
- [180] Peffer, T., Pritoni, M., Meier, A., Aragón, C., y Perry, D. How people use thermostats in homes: A review. *Building and Environment*, 46(12):2529 – 2541, 2011. ISSN 0360-1323.

- [181] Karjalainen, S. Should it be automatic or manual? - The occupant's perspective on the design of domestic control systems. *Energy and Buildings*, 65:119 – 126, 2013. ISSN 0378-7788.
- [182] Fox, M. y Miles, K. *Interactive Architecture*. Princeton Architectural Press, 2009. ISBN 9781568988368.
- [183] Trubiano, F. *Design and Construction of High-performance Homes: Building Envelopes, Renewable Energies and Integrated Practice*. Routledge, 2013. ISBN 9780415615280.
- [184] Meagher, M. Designing for change: The poetic potential of responsive architecture. *Frontiers of Architectural Research*, 4(2):159 – 165, 2015. ISSN 2095-2635.
- [185] Torres Al Bahar, W. <http://es.wikiarquitectura.com/index.php>. 2012.
- [186] Selkowitz, S. E. Integrating advanced façades into high performance buildings. En *Glass Processing Days: 7th International Conference on Architectural and Automotive Glass*, Tampere, Finland, 06/2001 2001.
- [187] Woods, L. Patente Perfectionnements apportés aux unités à deux vitres contenant un liquide, Patente núm. 2176916, 1973.
- [188] McClelland, J. Patente - Solar energy thermalization storage device - Patente núm. 4286576, 1981.
- [189] McKee, F. Patente - Improvement in or relating to windows, Patente núm. 0 075 464, 1982.
- [190] Chiapale, J., Damagnez, J., Denis, P., y Jourdan, P. Patente - Method and an installation for the air-conditioning of greenhouses and frames, Patente núm. 4108373, 1978.
- [191] Somos, A., Turi, I., Zatyko, F., J., G., y Borsody, L. Patente Process and apparatus for the utilization of solar geothermal energy in double wall structures. Patente núm. 4316450, 1982.
- [192] Seemann, R. A. Patente All season window, Patente núm. 4380994, 1983.
- [193] Belletti, W. Patente - Assemblage de matériaux translucides ou transparents en feuille de manière à former des compartiments pouvant être remplis ou vidés de fluides colorés a volonté pour baies vitrées ou vitrines, Patente núm. fr2599781a1, 1987.
- [194] McKee, F. Patente - Solar energy for structural elements - Patente núm. 2273151, 1994.
- [195] Lauret, B., Giménez, C., y Ovando, G. Patente - Cerramiento para el control de las cargas térmicas de edificios. Patente núm. 2 345 092, 2010.
- [196] IntelliGLASS - <http://www.intelliglass.com>, 2015.
- [197] Conectto - <http://www.conectto.com/>, 2016.

- [198] Solarleaf facade - Colt International Licensing Ltd. - <http://www.colt-info.de/files/pdf/sonnenschutz/colt-solarleaf-bioreactor-facade.pdf>, 2013.
- [199] Zumtobel Group Award - <http://www.zumtobel-group-award.com>, .
- [200] Rockwell automation - <http://literature.rockwellautomation.com>, .
- [201] Solarleaf Bioreactor Façade - ARUP - <http://www.arup.com/projects/solarleaf.aspx>.
- [202] Navigant research leaderboard report: Building energy management systems - <http://www.navigantresearch.com/research/navigant-research-leaderboard-report-building-energy-management-systems>, 2014.
- [203] Modicon M171 Performance Logic Controller - Hardware User Manual - <http://www.schneider-electric.com/en/product-range-download/62420-modicon-m171>, 2015.
- [204] Industrino, <http://www.industrino.com/>, 2015.
- [205] Cooking Hacks - <http://www.cooking-hacks.com/>, 2015.
- [206] Sparkfun - <http://www.sparkfun.com>, 2015.
- [207] Opternus Components - <http://www.opternus.com/en/siemens/development-tools/tp-uart2-board-btm2-pcb.html>, 2015.
- [208] Plataforma Arduino, <http://www.arduino.cc>, 2015.
- [209] Web of Science, <http://wos.fecyt.es/>, 2016.
- [210] ScienceDirect, <http://www.sciencedirect.com/>, 2017.
- [211] Metabuscador de recursos electrónicos Ingenio, <http://upm.summon.serialssolutions.com>, 2016.
- [212] Oficina Española de Patentes y Marcas - OEPM. Base de datos de invenciones en español - invenes, <http://consultas2.oepm.es/invenesweb/faces/busquedainternet.jsp>, 2016.
- [213] Latipat - <http://lp.espacenet.com/>, 2016.
- [214] Patentscope - World Intellectual Property Organization (WIPO) - <https://patentscope.wipo.int/>. 2016.
- [215] Full-Text and Image Database - United States Patent and Trademark Office (USPTO), <http://patft.uspto.gov/netahtml/pto/search-bool.html>, 2016.
- [216] Gobierno de España, Ministerio de Vivienda. *Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE)*. 2006.

- [217] Gobierno de España, Ministerio de la Presidencia. *Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.*
- [218] International Energy Agency (IEA), <http://www.iea.org>, 2016.
- [219] Gobierno de España - Presidencia del Gobierno. *Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la norma básica de edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios.*
- [220] IDAE. Las claves para conocer y actuar en materia de Certificación Energética de los Edificios IDAE - Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2008.
- [221] IDAE. Guías técnicas para la rehabilitación de la envolvente térmica de los edificios 5 - Soluciones de acristalamiento y cerramiento acristalado, 2008.
- [222] Grimmer, D., McFarland, R., y Balcomb, J. Initial experimental tests on the use of small passive-solar test-boxes to model the thermal performance of passively solar-heated buildings designs. *Solar Energy*, 22:351–354, 1979.
- [223] Ahmad, M., Bontemps, A., Sallée, H., y Quenard, D. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. *Energy and Buildings*, 38(6):673 – 681, 2006. ISSN 0378-7788.
- [224] Piccolo, A. Thermal performance of an electrochromic smart window tested in an environmental test cell. *Energy and Buildings*, 42(9):1409 – 1417, 2010. ISSN 0378-7788.
- [225] Carbonari, A., Fioretti, R., Naticchia, B., y P. Principi, P. Experimental estimation of the solar properties of a switchable liquid shading system for glazed facades. *Energy and Buildings*, 45: 299 – 310, 2012. ISSN 0378-7788.
- [226] Cattarin, G., Causone, F., Kindinis, A., y Pagliano, L. Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation – A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54:606 – 625, 2016. ISSN 1364-0321.
- [227] Structural sealant Dow Cornin 993. <http://www.dowcorning.com/>, 2016.
- [228] Lauret Aguirregabiria, B., Lirola Pérez, J., Ovando Vacarezza, G., Claros-Marfil, L. J., Pérez-Pujazón Millán, B., Castañeda Vergara, E., y Sánchez-González, J. Patente - Cerramiento dinámico para edificaciones, Solicitud nº: P201530064, 2015.
- [229] Claros-Marfil, L. J., Padial, J., y Lauret, B. A new and inexpensive open source data acquisition and controller for solar research: Application to a water-flow glazing. *Renewable Energy*, 92: 450 – 461, 2016. ISSN 0960-1481.
- [230] Creative Commons Attribution-Share Alike 2.5 Generic, 2015. Accessed 11th September 2015.

- [231] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet - Rev: 042208 - Maxim Integrated, 2008.
- [232] Adafruit Industries, <http://www.adafruit.com>, 2015.
- [233] SeeedStudio Bazaar, <https://www.seeedstudio.com/>, 2016.
- [234] Samurai Circuits. Mama Shield board - <http://samuraicircuits.com>, 2015.
- [235] Sainsmart - <http://www.sainsmart.com>, 2015.
- [236] RS Components, <http://es.rs-online.com/web/>, 2016.
- [237] Advanced photonix inc., <http://www.advancedphotonics.co.jp/en/index.html>, 2015.
- [238] DFRobot, <https://dfrobot.com/>, 2015.
- [239] Pulse Width Modulation (PWM) - Arduino Webpage <http://www.arduino.cc>, 2015.
- [240] Claros-Marfil, L. J., Lauret Aguirregabiria, B., Padial, J. F., Ovando Vacarezza, G., Lirola Pérez, J., Artacho Reinoso, M., Zambrana Pineda, A., y Benítez Díaz, F. Patente - Sistema de control domótico programable con capacidad de gestión energética para cerramiento activo transparente o translúcido, Patente núm. ES2537130A1, 2015.
- [241] Datalogger HOBO Onset modelo H08-032-08, <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/h08-032-08>, 2016.
- [242] Klein, S.A. et al. *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory. University Wisconsin-Madison*, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/index.html>, 2010.
- [243] Jelle, B. P. Solar radiation glazing factors for window panes, glass structures and electrochromic windows in buildings - measurement and calculation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 116:291–323, 2013. ISSN 0927-0248.
- [244] Strachan, P., Kokogiannakis, G., y Macdonald, I. History and development of validation with the ESP-r simulation program. *Building and Environment*, 43(4):601 – 609, 2008. ISSN 0360-1323. Part Special: Building Performance Simulation.
- [245] US Department of Energy - Lawrence Berkeley National Laboratory. *Window v7.1 Software*, 2013.
- [246] ESRU. ESP-r, <http://www.esru.strath.ac.uk>, 2005.
- [247] Sierra, P. y Hernández, J. A. Solar heat gain coefficient of water flow glazings. *Energy and Buildings*, 139:133 – 145, 2017. ISSN 0378-7788.

- [248] Chow, T. T., Lin, Z., He, W., Chan, A. L. S., y Fong, K. F. Use of ventilated solar screen window in warm climate. *Applied Thermal Engineering*, 26(16):1910 – 1918, 2006. ISSN 1359-4311.
- [249] Ismail, K. y Henríquez, J. Two-dimensional model for the double glass naturally ventilated window. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48:461–475, 2005.
- [250] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., y Lavine, A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer - Séptima edición*. Wiley, 2013. ISBN 9780470501979.
- [251] Thevenard, D. y Haddad, K. Ground reflectivity in the context of building energy simulation. *Energy and buildings*, 38(8):972–980, 2006.
- [252] Loonen, R., Favoino, F., M., H. J. L., y Overend, M. Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation*, 0(0):1–19, 0.
- [253] Ritter, V., Matschi, C., y Schwarz, D. Assessment of five control strategies of an adjustable glazing at three different climate zones. (3):129–141, 2015.
- [254] Chow, T. T., Li, C., y Zhang, L. Innovative solar windows for cooling-demand climate. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2):212–220, 2010. ISSN 0927-0248.
- [255] Sketchup, <https://www.sketchup.com/es>, 2016.
- [256] AENOR. UNE-EN ISO 10077-1:2010 Comportamiento térmico de ventanas, puertas y persianas. Cálculo de la transmitancia térmica. Parte 1: Generalidades, 2010.
- [257] AENOR. UNE-EN 12207:2000. Ventanas y puertas. Permeabilidad al aire. Clasificación, 2000.
- [258] AENOR. UNE-EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005), 2006.
- [259] Gobierno de España, Ministerio de Industria, Energía y Turismo, y Ministerio de Fomento. *Documento Reconocido del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE). Factores de emisión de CO2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España*. 2016.
- [260] Trane, <http://www.trane.com/>, 2016.
- [261] International Glazing Database IGDB - <https://windows.lbl.gov/materials/igdb/>, 2017.

- [262] Generador de precios de la construcción, España - CYPE Ingenieros S.A., <http://www.generadordeprecios.info/>, 2017.
- [263] García-Erviti, F., Armengot-Paradinas, J., y Ramírez-Pacheco, G. El análisis del coste del ciclo de vida como herramienta para la evaluación económica de la edificación sostenible. Estado de la cuestión. 2015.
- [264] Wiring - <http://wiring.org.co/>, 2015.
- [265] XBee - <http://www.xbee.cl/>, 2015.
- [266] Linke, B. *Overview of 1-Wire Technology and Its Use - Tutorial 1796 - Maxim Integrated*, 2008.
- [267] SPI/I2C bus lines control multiple peripherals - Application Note 4024, Maxim Integrated Products, Inc., 2007.

Anexos

Elementos del montaje experimental

En este anexo se describen los elementos que componen el montaje experimental, junto con sus especificaciones técnicas.

A.1. Bomba circuladora principal (B1)

Para hacer circular el fluido a través de los diferentes componentes de la instalación se ha empleado una bomba Shurflo Nautilus (figura A.1) por sus las características apropiadas de caudal y presión, así como por su buena relación calidad/precio. Sus principales características y los datos correspondientes a su curva de funcionamiento pueden verse en las tablas A.1 y A.2.

Figura A.1: Bomba impulsora Shurflo Nautilus. Fuente: Archivo propio

Marca	Modelo	Tensión trabajo (V)	Conexiones
Shurflo	Nautilus 100-000-21	12 V DC	3/8"

Tabla A.1: Principales características de la bomba empleada

Presión (bar)	Caudal (l/min)	Intensidad (A)
0	1	1,5
0,3	2,6	1,7
0,7	1,1	2
1	4,9	2,4

Tabla A.2: Valores de la curva de operación de la bomba

A.2. Bomba circuladora secundaria (B2)

Para hacer circular el fluido a través del disipador en condiciones de verano y refrigerar el fluido almacenado en el tanque se ha empleado una bomba Grundfos (figura A.2) seleccionada a partir de sus características técnicas y su coste reducido. Sus curvas de funcionamiento para cada velocidad, así como sus principales características, pueden verse en la figura A.2b y en la tablas A.3 y A.4.

Figura A.2: Bomba circuladora secundaria. Fuente: Grundfos

Marca	Modelo	Tensión trabajo	Hmax)	Conexiones	Velocidades
Grundfos	UPS 15/50	230 V AC	50 dm	1"	3

Tabla A.3: Principales características de la bomba secundaria. Fuente: Grundfos

Intensidad (A)	Consumo (W)
0,18	40
0,30	65
0,41	95

Tabla A.4: Datos de consumo eléctrico de la bomba secundaria. Fuente: Grundfos

A.3. Electroválvulas

Para dirigir el fluido a través de los diferentes circuitos de los que consta la instalación se han empleado electroválvulas de dos vías de la marca Parker Lucifer con cuerpo de latón. Estas válvulas son normalmente cerradas y disponen de conexiones de 1/2". Su accionamiento de apertura y cierre se lleva a cabo mediante solenoides de la misma marca.

El principal criterio para seleccionar estas válvulas ha sido que, al contrario que otro tipo de válvulas como las utilizadas en sistemas de riego, no necesitan una presión mínima para llevar a cabo su apertura, lo que resulta fundamental en el montaje experimental empleado en el que únicamente se dispone de la presión de columna de agua debida a la altura del líquido en el depósito de acumulación.

(a) Cuerpo de la válvula

(b) Solenoide

Figura A.3: Componentes de una electroválvula. Fuente: Archivo propio

Marca	Modelo	Tensión	Presión apertura	Conexiones
Parker Lucifer	DZ02C05	110 - 125 V DC	$\simeq 0$ (bar)	1/2"

Tabla A.5: Principales características de las electroválvulas

A.4. Depósito de acumulación

Como tanque de acumulación de agua caliente se ha utilizado un depósito de 100 litros fabricado en polipropileno. Este depósito fue aislado posteriormente con planchas de 10 cm de poliestireno expandido (XPS) (figura A.4) y sus características pueden verse en la tabla A.6.

Figura A.4: Depósito de acumulación original y una vez aislado. Fuente: Archivo propio

Material	Capacidad	Aislante	Espesor aislante
Polipropileno	100 litros	XPS	10 cm

Tabla A.6: Principales características del depósito

A.5. Disipador

Como disipador se ha empleado un radiador equipado con un ventilador (figura A.5)

Figura A.5: Disipador empleado para enfriar el agua. Fuente: Archivo propio

Tensión	Conexiones	Velocidad
12 V DC	$\simeq 1''$	300 rpm

Tabla A.7: Principales características del disipador

A.6. Resistencia eléctrica calefactora

Para llevar los módulos de ensayo hasta una temperatura de confort en condiciones de invierno se ha empleado una resistencia eléctrica flexible de silicona (figura A.6), con una longitud de tres metros y con una potencia de 90 W. Sus características completas se muestran en la tabla A.8.

Figura A.6: Resistencia eléctrica flexible instalada en los módulos de ensayo

Marca	Material	Tensión	Potencia	Resistencia	Longitud
Electricfor	Silicona	230 V AC	90 W	196 Ω /m	3 m

Tabla A.8: Principales características de la resistencia calefactora

Elementos del sistema domótico de control

B.1. Componentes del primer prototipo

En este anexo se describen los elementos que componen el sistema de control, junto con sus especificaciones técnicas y las hojas de características del fabricante.

B.1.1. Placa controladora

La placa controladora empleada en este caso fue la Arduino Uno (figura B.1). Pueden encontrarse las especificaciones técnicas completas de esta placa en el Anexo 2.1.1.a.

Figura B.1: Placa Arduino Uno. Fuente: Arduino [208].

Fabricante	Arduino
Microcontrolador	ATMega328P
Arquitectura	8 bits
Voltaje operación	5 V
Voltaje entrada recom.	7-12 V
Velocidad reloj	16 MHz
Memoria flash	32 KB
E/S digitales	14
Salidas con PWM	6
Entradas analógicas	6
Largo	68,6 mm
Ancho	53,4 mm
Precio	~25 €

Tabla B.1: Características de la placa Arduino Uno. Fuente: Arduino [208]

2.1.1.a. Arduino

Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y sencillos de usar desarrollada en por el denominado *Arduino team*. Este equipo está compuesto por : Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, y David Mellis [208]. Aunque existen diferentes versiones de las placas Arduino, actualmente el modelo más extendido lo constituye el modelo Arduino Uno, que es la que se toma como punto de partida en el presente trabajo. El nombre *Uno*, hace referencia al lanzamiento de Arduino 1.0, constituyendo ambos las versiones de referencia de la plataforma.

Las placas Arduino son capaces de adquirir información del entorno a través de una amplia variedad de sensores conectados a sus pines de entrada, pudiendo controlar sistemas relacionados con motores, sistemas de iluminación, seguridad y otros actuadores.

Arduino dispone de su propio entorno de desarrollo o *IDE*, basado en el entorno de programación de Wiring¹ [264] y su programación se lleva a cabo mediante el lenguaje de programación C (con algunas funcionalidades de C++). Este entorno de desarrollo puede descargarse gratuitamente desde la página web de Arduino [208].

¹Puede verse una referencia rápida de este entorno/lenguaje de programación en <http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>

Figura B.2: Ejemplo de código C en el entorno de desarrollo de Arduino. Fuente: Archivo propio.

Actualmente existen diferentes versiones de las placas Arduino: Uno, Mega, Nano, Lily, etc., cada una con sus propias características y está orientada a distintas aplicaciones.

Los proyectos basados en esta plataforma pueden ejecutarse directamente desde la placa, sin necesidad de que esté conectada a un ordenador personal, por lo que es posible que funcionen tanto de manera autónoma como conectados a un ordenador personal, teniendo también la posibilidad de hacerlo comunicándose con diferentes tipos de software y hardware, pudiendo dar lugar así a sistemas de creciente complejidad.

Además, al tratarse de hardware libre, las placas Arduino pueden comprarse o construirse manualmente a partir del correspondiente esquema, cuyos ficheros de diseño en CAD están disponibles bajo una licencia abierta. Estas características la hacen una opción interesante debido a su bajo coste y a su gran disponibilidad.

El empleo de placas basadas en plataformas de hardware de coste reducido para el desarrollo de todo tipo de aplicaciones está en plena efervescencia, ya que además de la plataforma libre Arduino que sigue desarrollando nuevas placas mejoradas y de coste reducido como la Arduino Leonardo basada en el microcontrolador ATmega32u4 que tiene integradas las funciones de comunicación USB permitiendo eliminar la necesidad de un procesador secundario, o la potente Arduino DUE (B.4) con un microprocesador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 con una frecuencia de reloj 84 Mhz.

Figura B.3: Arduino Leonardo equipada con el ATmega32u4. Fuente: Web Arduino [208].

Figura B.4: Arduino DUE dotada con el microprocesador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3. Fuente: Web Arduino [208].

2.1.1.b. Arduino UNO

Arduino Uno es una placa basada en un microcontrolador ATmega328, de la familia ATMel, con 14 salidas/entradas digitales, 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal a 16 Mhz, una conexión USB, un conector de corriente, un conector tipo *Programación Serial In-Circuit (ICSP)* y un botón de reset. Esta placa es capaz de funcionar de manera autónoma, necesitando únicamente una fuente de corriente, que puede aportarse mediante tanto mediante el conector USB, como mediante el correspondiente conector. La placa *Uno* se diferencia de todas las anteriores en que no usa el chip controlador FTDI USB/serie, sino que emplea el ATmega8U2 como convertidor.

Figura B.5: Placa Arduino UNO. Fuente: Arduino [208]

Como puede verse en la figura B.5, la placa dispone de conectores verticales que encajan con otras tarjetas que se conectan cómo módulos para ampliar sus funcionalidades. Existen un gran número de módulos compatibles con Arduino Uno, entre ellos módulos para añadir comunicación Ethernet, Bluetooth, XBee [265]; módulos para el control de motores, etc. Además pueden crearse otros módulos a medida, ya que al ser un proyecto de hardware libre en su web [208] se encuentra toda la documentación sobre el proyecto.

En la tabla B.2 se describen algunas de las características técnicas de la placa Uno.

Microcontrolador	ATMega328
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Pines digitales E/S	14
Pines de entrada analógica	6
CC por pin E/S	40 mA
CC por pin 3,3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (0,5 KB usados por el Bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad reloj	16 Mhz

Tabla B.2: Especificaciones técnicas de la placa Arduino Uno. Fuente: Web Arduino [208].

Puede verse un esquema de la placa Arduino Uno en la página siguiente.

Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. ARDUINO DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information. ARDUINO is a registered trademark. Use of the ARDUINO name must be compliant with <http://www.arduino.cc/en/Main/Policy>

B.1.2. Sensores de temperatura

Después de analizar los diferentes tipos de sensores de temperatura disponibles, tales como termopares o termistores, se ha decidido emplear sensores digitales de temperatura, y más concretamente el Maxim DS18B20 [231] (figura B.6). Se ha optado por el este sensor debido a sus buenas prestaciones, la posibilidad de emplear el protocolo *OneWire* [266], que permite enviar la señal de hasta 27 sensores por una sola línea digital, y por su buena relación calidad precio.

Figura B.6: Sensor temperatura DS18B20. Fuente: Archivo propio

Fabricante	Maxim
Modelo	DS18B20
Rango temperatura	-55 a 125 °C
Precisión	0,5 °C
Resolución	9 a 12 bits
Voltaje operación	3 - 5,5 V
Interfaz	OneWire
Empaquetado	3-pines TO-92
Precio	~8 €

Tabla B.3: Características del sensor DS18B20. Fuente: Maxim [231]

2.1.2.a. Ficha técnica - Sensor de temperatura

DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

DESCRIPTION

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. It has an operating temperature range of -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ and is accurate to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ over the range of -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

FEATURES

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Each Device has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in an On-Board ROM
- Multidrop Capability Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications
- Requires No External Components
- Can Be Powered from Data Line; Power Supply Range is 3.0V to 5.5V
- Measures Temperatures from -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ (-67°F to $+257^{\circ}\text{F}$)
- $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Accuracy from -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$
- Thermometer Resolution is User Selectable from 9 to 12 Bits
- Converts Temperature to 12-Bit Digital Word in 750ms (Max)

- User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings
- Alarm Search Command Identifies and Addresses Devices Whose Temperature is Outside Programmed Limits (Temperature Alarm Condition)
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin μSOP , and 3-Pin TO-92 Packages
- Software Compatible with the DS1822
- Applications Include Thermostatic Controls, Industrial Systems, Consumer Products, Thermometers, or Any Thermally Sensitive System

PIN CONFIGURATIONS

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

ORDERING INFORMATION

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE	TOP MARK
DS18B20	-55°C to +125°C	3 TO-92	18B20
DS18B20+	-55°C to +125°C	3 TO-92	18B20
DS18B20/T&R	-55°C to +125°C	3 TO-92 (2000 Piece)	18B20
DS18B20+T&R	-55°C to +125°C	3 TO-92 (2000 Piece)	18B20
DS18B20-SL/T&R	-55°C to +125°C	3 TO-92 (2000 Piece)*	18B20
DS18B20-SL+T&R	-55°C to +125°C	3 TO-92 (2000 Piece)*	18B20
DS18B20U	-55°C to +125°C	8 μ SOP	18B20
DS18B20U+	-55°C to +125°C	8 μ SOP	18B20
DS18B20U/T&R	-55°C to +125°C	8 μ SOP (3000 Piece)	18B20
DS18B20U+T&R	-55°C to +125°C	8 μ SOP (3000 Piece)	18B20
DS18B20Z	-55°C to +125°C	8 SO	DS18B20
DS18B20Z+	-55°C to +125°C	8 SO	DS18B20
DS18B20Z/T&R	-55°C to +125°C	8 SO (2500 Piece)	DS18B20
DS18B20Z+T&R	-55°C to +125°C	8 SO (2500 Piece)	DS18B20

+Denotes a lead-free package. A "+" will appear on the top mark of lead-free packages.

T&R = Tape and reel.

*TO-92 packages in tape and reel can be ordered with straight or formed leads. Choose "SL" for straight leads. Bulk TO-92 orders are straight leads only.

PIN DESCRIPTION

PIN			NAME	FUNCTION
SO	μ SOP	TO-92		
1, 2, 6, 7, 8	2, 3, 5, 6, 7	—	N.C.	No Connection
3	8	3	V _{DD}	Optional V _{DD} . V _{DD} must be grounded for operation in parasite power mode.
4	1	2	DQ	Data Input/Output. Open-drain 1-Wire interface pin. Also provides power to the device when used in parasite power mode (see the <i>Powering the DS18B20</i> section.)
5	4	1	GND	Ground

OVERVIEW

Figure 1 shows a block diagram of the DS18B20, and pin descriptions are given in the *Pin Description* table. The 64-bit ROM stores the device's unique serial code. The scratchpad memory contains the 2-byte temperature register that stores the digital output from the temperature sensor. In addition, the scratchpad provides access to the 1-byte upper and lower alarm trigger registers (T_H and T_L) and the 1-byte configuration register. The configuration register allows the user to set the resolution of the temperature-to-digital conversion to 9, 10, 11, or 12 bits. The T_H, T_L, and configuration registers are nonvolatile (EEPROM), so they will retain data when the device is powered down.

The DS18B20 uses Maxim's exclusive 1-Wire bus protocol that implements bus communication using one control signal. The control line requires a weak pullup resistor since all devices are linked to the bus via a 3-state or open-drain port (the DQ pin in the case of the DS18B20). In this bus system, the microprocessor (the master device) identifies and addresses devices on the bus using each device's unique 64-bit code. Because each device has a unique code, the number of devices that can be addressed on one

B.1.3. Placa registradora de datos

Como registrador de datos se ha utilizado una placa que dispone de un chip reloj en tiempo real (RTC) y almacena los datos en una tarjeta de memoria SD. De esta forma los datos se registran instantáneamente, indicando en cada registro la fecha y la hora en la que se han llevado a cabo las lecturas. Estos datos registrados se guardan en un formato apropiado para ser exportados posteriormente desde una aplicación tipo hoja de cálculo.

Una vez analizadas las diferentes posibilidades existentes en el mercado, se optó por la placa SD logger de Adafruit (figura B.7), por ser la que más se adaptaba a las necesidades del prototipo.

Figura B.7: Placa datalogger de Adafruit. Fuente: Archivo propio

Fabricante	Adafruit
Modelo	SD datalogger
Voltaje operación	5 V
Chip RTC	DS1307
Almacenamiento	Tarjeta SD/MMC
Formato Tarjeta SD	FAT16/FAT32
Tipo archivo	Separado por comas (CSV)
Precio	~18 €

Tabla B.4: Características de la placa datalogger. Fuente: Adafruit [232]

B.1.4. Placa de relés

Como en cualquier sistema de control, para llevar a cabo el accionamiento de los diferentes elementos actuadores del sistema se ha empleado una placa de relés. En las pruebas preliminares de puesta a punto del prototipo se empleó una placa de 4 relés de la figura B.8 cuyas características técnicas se indican en la tabla B.5.

Figura B.8: Placa de relés. Fuente: Seeed Studio [233]

Fabricante	Seeed Studio
Modelo	Relay shield v1.2b
Núm. relés	4
Tipo relés	Estado sólido fotoacoplado
Capacidad conmutación	3 A
	120 V CA / 24 V CC
Máx. voltaje conmutación	240 V CA / 60 V CC
Máx. corriente conmutación	5 A
Máx. potencia conmutación	360 VA CA / 90 W CC
Voltaje operación	9 V
Precio	~18 €

Tabla B.5: Características de la placa de relés. Fuente: Seeed Studio [233]

Control domótico de un acrist. activo con cámara de agua circulante
para la reducción de la demanda energética de EECN

Anexo B: Comp. del sist. de control

2.1.4.a. Ficha técnica - Placa de relés

FEATURES

- | 4 solid relays with photo-coupled circuit
- | Equipped with screw holes for easy installation
- | Light weight
- | Small form factor
- | Native [Arduino](#)/[Seeeduino](#) compatibility
- | Extendible

KEY SPECIFICATIONS (PER CHANNEL)

Contact Rating	3A AC 120V / DC 24V
Maximal Switching Voltage	AC 240V / DC 60V
Max Switching Current	5A
Max Switching Power	AC 360VA / DC 90W
Electrical Life Expectancy	100,000 Operations
Mechanical Life Expectancy	10,000,000 Operations
Safety Standard(relay)	UL cUL TUV CQC
Working Voltage	9VDC
Weight	165g
Working temperature	-30°C to +85°C
Working Humidity	40% - 85%

LICENSING

This documentation is licensed under the Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike License 3.0. Source code and libraries are licensed under [GPL/LGPL](#), see source code files for details.

CAUTIONS

Please be very careful while operating high voltage circuits! You may get hurt or hurt the appliances if used improperly.

BLOCK DIAGRAM

4 groups of channels for High voltage connection

Group1:

COM1- Common pin

NC1- Normally Closed, in which case NC1 is connected with COM1 when D0 is set low and disconnected when D0 is high;

NO1- Normally Open, in which case NO1 is disconnected with COM1 when D0 is set low and connected when D0 is high.

Group2-4 is similar to Group except the control port being D1-D3.

9v power supply connection

B.1.5. Placa de conexiones

Para facilitar la conexión entre la placa Arduino Uno con las placas datalogger y de relés se ha empleado unas placa de conexiones denominadas Mama Shield (figura B.9) fabricada por Samuai Circuits [234]. Esta placa permite la conexión de diferentes hasta 5 placas con la placa Arduino de manera compacta.

Figura B.9: Placas Mama Shield. Fuente: Samurai Circuits [234]

Fabricante	Samurai Circuits
Modelo	Mama shield v1.0
Pines analógicos conectados	0 - 5
Pines digitales conectados	2 - 13
Pines intercambiables	Digitales: 0,1; Reset, 3.3 V, A_{ref} y V_{in}
Pines no configurables	5 V y GND
Precio	~30 €

Tabla B.6: Características de la placas conectoras. Fuente: Seeed Studio [233]

B.2. Componentes adicionales del segundo prototipo

B.2.1. Placa controladora

La placa a partir de la cual se ha montado el sistema de control es una Arduino Mega ADK. Entre sus principales características destacan el microcontrolador ATMEL AT2560 con un reloj a 16 MHz,

con 256 KB de memoria flash. En lo que respecta a las conexiones, esta placa posee 54 E/S digitales y 14 entradas analógicas. Por otro lado, posee una conexión USB y un jack de alimentación de 7-12 V. Pueden encontrarse las especificaciones técnicas completas de esta placa en el anexo 2.1.1.a.

Figura B.10: Placa Arduino Mega ADK. Fuente: Arduino [208]

Fabricante	Arduino
Microcontrolador	Atmel 2560
Arquitectura	8 bits
Voltaje operación	5 V
Voltaje entrada recom.	7-12 V
Velocidad reloj	16 MHz
Memoria flash	256 KB
E/S digitales	54
Salidas con PWM	15
Entradas analógicas	16
USB Host Interface	Sí, basada en MAX3421e IC
Largo	101.52 mm
Ancho	5303 mm
Precio	~55 €

Tabla B.7: Características de la placa Arduino Mega ADK. Fuente: Arduino [208]

B.2.2. Arduino Mega ADK

La placa Arduino Mega ADK (*Android development kit o Kit de desarrollo Android*) es una placa basada en el microprocesador ATmega2560. Tiene un interfaz USB host que le permite conectarse a teléfonos con sistema operativo Android ², basada en el MAX3421 e IC. Dispone de 54 E/S digitales

²Android es un sistema operativo móvil basado en GNU/Linux, que está enfocado para ser utilizado en dispositivos móviles como teléfonos inteligentes basados en procesadores ARM, tabletas y otros dispositivos de comunicación móviles, <http://www.android.com/>.

Control domótico de un acrist. activo con cámara de agua circulante
para la reducción de la demanda energética de EECN

Anexo B: Comp. del sist. de control

de los cuales 14 pueden utilizar modulación por ancho de pulsos (PWM) 16 entradas analógicas, 4 UARTS (puertos serie hardware), un reloj de 16 Mhz, una conexión USB, una conexión eléctrica una cabecera ICSP y un botón de reset. Como su nombre indica, esta placa está basada en la placa Arduino Mega 2560.

Figura B.11: Placa Arduino Mega ADK

Puede verse un esquema de la placa Arduino Mega ADK en la página siguiente.

Arduino™ MEGA 2560

Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS." Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED. REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information.

ARDUINO is a registered trademark.

2.2.2.a. Esquema de la placa Arduino Mega 2560

B.2.3. Módulo de 8 relés

Dada la complejidad que iba adquiriendo el sistema, se decidió emplear una placa de 8 relés optoaislados³ (B.12) por la posibilidad de actuar sobre un mayor número de elementos y sus mejores características técnicas.

Figura B.12: Placa de 8 relés optoaislados. Fuente: Archivo propio

Fabricante	SainSmart
Modelo	8 Relay module
Núm. relés	8
Tipo relés	Estado sólido fotoacoplado
Capacidad conmutación	10 A 250 V CA/ 30 V CC
Máx. voltaje conmutación	250 V CA / 110 V CC
Máx. corriente conmutación	10 A
Máx. potencia conmutación	1200 VA CA / 280 W CC
Voltaje operación	5 V
Precio	~15 €

Tabla B.8: Características de la placa de relés. Fuente: SainSmart [235]

B.2.4. Pantalla LCD

La pantalla LCD constituye el elemento que proporciona información al usuario. Desde el momento del arranque en el que informa de la versión del programa, va indicando el estado en el que se encuentra el sistema. Además al disponer de pulsadores permite comprobar los valores de las diferentes variables del sistema en cada momento

³En este tipo de relés la transmisión de la señal se lleva a cabo de manera óptica, de manera que los circuitos permanecen aislados eléctricamente.

Figura B.13: Pantalla LCD 16x2 y detalle de su conexión. Fuente: Archivo Propio

Fabricante	Adafruit
Modelo	RGB 16x2 con botones
Pantalla	Hitachi HD44780
Bus Comunicaciones	I2C [267]
Botones	5 + Reset
I2C Chip	MCP23017
Ancho	81,3 mm
Alto	53,3 mm
Precio	~ 8 €

Tabla B.9: Características de la pantalla LCD. Fuente: Adafruit [232]

B.3. Componentes adicionales del tercer prototipo

B.3.1. Fotorresistencia

A partir de los valores de intensidad lumínica proporcionados por la fotorresistencia (figura B.14) el sistema será capaz de alternar entre los modos diurno y nocturno. Sus características técnicas se muestran en la tabla B.10.

Figura B.14: Fotocélula. Fuente: Cooking Hacks [205] y Archivo propio

Fabricante	Advanced Photonix Inc.
Modelo	PDV-P8001
Material	CdS
Rango espectral	400-700 nm
Resistencia en oscuridad	0,2 MΩ
Resistencia en presencia luz	3 - 11 kΩ
Sensibilidad	0,6 Ω/Lux
Tiempo activación	55 ms
Tiempo desactivación	20 ms

Tabla B.10: Especificaciones técnicas de la fotorresistencia. Fuente: Advanced Photonix, Inc. [237]

2.3.1.a. Ficha técnica - Fotorresistencia

PACKAGE DIMENSIONS INCH [mm]

FEATURES

- Visible light response
- Sintered construction
- Low cost

DESCRIPTION

The **PDV-P8001** are (CdS), Photoconductive photocells designed to sense light from 400 to 700 nm. These light dependent resistors are available in a wide range of resistance values. They're packaged in a two leaded plastic-coated ceramic header.

APPLICATIONS

- Camera exposure
- Shutter controls
- Night light Controls

ABSOLUTE MAXIMUM RATING (TA)= 23°C UNLESS OTHERWISE NOTED

SYMBOL	PARAMETER	MIN	MAX	UNITS
V _{pk}	Applied Voltage		150	V
P _{d Δpo/Δt}	Continuous Power Dissipation		100	mW/°C
T _O	Operating and Storage Temperature	-30	+75	°C
T _S	Soldering Temperature*		+260	°C

* 0.200 inch from base for 3 seconds with heat sink.

ELECTRO-OPTICAL CHARACTERISTICS RATING (TA)= 23°C UNLESS OTHERWISE NOTED

SYMBOL	CHARACTERISTIC	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
R _D	Dark Resistance	After 10 sec. @ 10 Lux @ 2856 °K	0.2			MΩ
R _I	Illuminated Resistance	10 Lux @ 2856 °K	3		11	KΩ
S	Sensitivity	$\frac{\text{LOG}(R_{100}) - \text{LOG}(R_{10})^{**}}{\text{LOG}(E_{100}) - \text{LOG}(E_{10})^{***}}$		0.6		Ω/Lux
λ _{range}	Spectral Application Range	Flooded	400		700	nm
λ _{peak}	Spectral Application Range	Flooded		520		nm
t _r	Rise Time	10 Lux @ 2856 °K		55		ms
T _f	Fall Time	After 10 Lux @ 2856 °K		20		ms

**R₁₀₀, R₁₀: cell resistances at 100 Lux and 10 Lux at 2856 °K respectively .

***E₁₀₀, E₁₀: luminances at 100 Lux and 10 Lux 2856 °K respectively.

Information in this technical datasheet is believed to be correct and reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omission. Specifications are subject to change without notice.

B.3.2. Medidor de nivel

Con idea de conocer en cada momento el volumen de agua contenido en el tanque de almacenamiento se decidió dotar al sistema con un medidor de nivel por ultrasonidos. Este medidor, una vez calibrado, proporciona en cada momento el volumen de agua contenido en el tanque, lo que permite tener en cuenta esta variable a lo largo del experimento y permite detener el sistema generando la alarma correspondiente en caso de una disminución anormal del nivel.

(a) Sensor de nivel mediante ultrasonidos

(b) Conexión sensor

Figura B.15: Sensor de nivel mediante ultrasonidos. Fuente: Web Seed Studio

Fabricante	Varios
Modelo	HC-SR04
Pines de conexión	4
Voltaje operación	5 V
Corriente alimentación	15 mA
Rango medida	0,02 - 4 m
Resolución	0,3 cm
Frecuencia pulso	40 kHz
Apertura pulso	15 - 30°
Señal de disparo	10 μ s
Largo	45 mm
Ancho	20 mm
Precio	~2 €

Tabla B.11: Especificaciones técnicas del sensor de ultrasonidos. Fuente: Adafruit [232]

B.3.3. Placa reguladora de motor

La placa reguladora de motor es la encargada de alimentar las bombas circuladoras en función de la potencia requerida, lo que permitiría regular a voluntad la velocidad de las bombas en función

de los requerimientos del sistema. Las características técnicas de esta placa pueden verse en la tabla B.12.

Figura B.16: Placa reguladora de la bomba. Fuente: DFRobot [238]

Fabricante	DFRobot
Modelo	DFRduino L298P Shield
Núm. canales motores	2
Voltaje operación lógica	5 V (desde Arduino)
Voltaje motores	4,8 - 35 V (desde Arduino o fuente ext.)
Intensidad máx. motores	2 A
Consumo máx. (T=75°C)	25 W
Regulación de velocidad	PWM, PLL
Precio	~17€

Tabla B.12: Especificaciones de la placa controladora de motor. Fuente: DFRobot [238]

Control domótico de un acrist. activo con cámara de agua circulante
para la reducción de la demanda energética de EECN

Anexo B: Comp. del sist. de control

2.3.3.a. Ficha técnica - Placa reguladora

Arduino Motor Shield (L298N) (SKU:DRI0009)

From Robot Wiki

Contents

- 1 Introduction
- 2 Specification
- 3 PinOut
- 4 Tutorial
 - 4.1 Connection Diagram
 - 4.2 Sample Code
 - 4.2.1 PWM Speed Control
 - 4.2.2 PLL Speed Control
- 5 Trouble shooting
- 6 More

Introduction

This motor shield allows Arduino to drive two channel DC motors. It uses a L298N chip which delivers output current up to 2A each channel. The speed control is achieved through conventional PWM which can be obtained from Arduino's PWM output Pin 5 and 6. The enable/disable function of the motor control is signalled by Arduino Digital Pin 4 and 7.

The Motor shield can be powered directly from Arduino or from external power source. It is strongly encouraged to use external power supply to power the motor shield.

Specification

- Logic Control Voltage : 5V (From Arduino)
- Motor Driven Voltage : 4.8~35V (From Arduino or External Power Source)
- Logic supply current I_{ss} : $\leq 36\text{mA}$
- Motor Driven current I_o : $\leq 2\text{A}$
- Maximum power consumption : 25W ($T=75^{\circ}\text{C}$)
- PWM、PLL Speed control mode
- Control signal level:

High : $2.3\text{V} \leq V_{in} \leq 5\text{V}$

Low : $-0.3\text{V} \leq V_{in} \leq 1.5\text{V}$

PinOut

Control Mode Selection Jumpers: The shield supports PWM and PLL(Phased Locked Loop) control Modes. The PWM mode uses E1 and E2 to generate PWM signal. The PLL mode uses M1 and M2 to generate phase control signal.

Motor Terminal: Two DC motors are connected to blue motor terminals. The male header behind the terminals are the same as the motor terminals.

PWRIN: The motors can be powered by external power supply when the motor current exceeds the limits provided from the Arduino. The swith between external and Arduino power is implemented by two jumpers.

- PWRIN: External Power
- VIN: Arduino Power

NOTE: When the motor shield is powered by external power source, make sure the external power source and A

Control Signal Truth Table:

E1	M1		E2	M2	
L	X	Motor 1 Disabled	L	X	Motor 2 Disabled
H	H	Motor 1 Backward	H	H	Motor 2 Backward
PWM	X	PWM Speed control	PWM	X	PWM Speed control

Note:H is High level ;L is Low level ;PWM is Pulse Width Modulation signal; X is any voltage level

"PWM Mode"

Pin	Function
Digital 4	Motor 1 Direction control
Digital 5	Motor 1 PWM control
Digital 6	Motor 2 PWM control
Digital 7	Motor 2 Direction control

"PLL Mode"

Pin	Function
Digital 4	Motor 1 Enable control
Digital 5	Motor 1 Direction control
Digital 6	Motor 2 Direction control

Tutorial

Connection Diagram

Sample Code

PWM Speed Control

```
?
1 //Arduino PWM Speed Control:
2 int E1 = 5;
3 int M1 = 4;
4 int E2 = 6;
5 int M2 = 7;
6
7 void setup()
8 {
9     pinMode(M1, OUTPUT);
10    pinMode(M2, OUTPUT);
11}
```

```

12
13void loop()
14{
15  int value;
16  for(value = 0 ; value <= 255; value+=5)
17  {
18    digitalWrite(M1,HIGH);
19    digitalWrite(M2, HIGH);
20    analogWrite(E1, value);    //PWM Speed Control
21    analogWrite(E2, value);    //PWM Speed Control
22    delay(30);
23  }
24}

```

PLL Speed Control

```

?
1 //Arduino PLL Speed Control:
2 int E1 = 4;
3 int M1 = 5;
4 int E2 = 7;
5 int M2 = 6;
6
7 void setup()
8 {
9   pinMode(M1, OUTPUT);
10  pinMode(M2, OUTPUT);
11  pinMode(E1, OUTPUT);
12  pinMode(E2, OUTPUT);
13}
14
15void loop()
16{
17  int value;
18  for(value = 0 ; value <= 255; value+=5)
19  {
20    digitalWrite(E1,HIGH);
21    digitalWrite(E2, HIGH);
22    analogWrite(M1, value);    //PLL Speed Control
23    analogWrite(M2, value);    //PLL Speed Control
24    delay(30);
25  }
26}

```

Trouble shooting

PWM speed control is used to simulate different voltage value accounted for by adjusting the air to control

$$\text{output_voltage} = (\text{on_time} / \text{off_time}) * \text{max_voltage}$$

More question and cool idea, visit DFRobot Forum (<http://www.dfrobot.com/index.php?route=DFblog/blogs>)

More

Shield diagram (<http://www.shieldlist.org/dfrobot/2a-motor>)

Library installation (<https://www.arduino.cc/en/Guide/Libraries#.UxU8mdzF9H0>)

➔ Click to buy on DFRobot Store (http://www.dfrobot.com/index.php?route=product/product&keyword=DRI0009&category_id=0&description=1&model=1&product_id=69)

➔ DFRobot Distributor List (<http://www.dfrobot.com/index.php?route=information/distributorslogo>)

Retrieved from "[https://www.dfrobot.com](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=Arduino_Motor_Shield_(L298N)_<div>(SKU:DRI0009)&oldid=29792)

[/wiki/index.php?title=Arduino_Motor_Shield_\(L298N\)_<div>\(SKU:DRI0009\)&oldid=29792](https://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=Arduino_Motor_Shield_(L298N)_<div>(SKU:DRI0009)&oldid=29792)"

Categories: Product Manual | DRI Series | Motor Controllers | Shields

-
- This page was last modified on 7 August 2015, at 06:47.
 - This page has been accessed 164,105 times.

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-

nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

BLOCK DIAGRAM

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_S	Power Supply	50	V
V_{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V_I, V_{en}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I_O	Peak Output Current (each Channel)		
	– Non Repetitive ($t = 100\mu s$)	3	A
	– Repetitive (80% on –20% off; $t_{on} = 10ms$)	2.5	A
	– DC Operation	2	A
V_{sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P_{tot}	Total Power Dissipation ($T_{case} = 75^\circ C$)	25	W
T_{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
T_{stg}, T_j	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

PIN CONNECTIONS (top view)

THERMAL DATA

Symbol	Parameter		PowerSO20	Multiwatt15	Unit
$R_{th\ j-case}$	Thermal Resistance Junction-case	Max.	–	3	$^\circ C/W$
$R_{th\ j-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max.	13 (*)	35	$^\circ C/W$

(*) Mounted on aluminum substrate

Title			L298 Shield		
Size	Number	Revision			
A4		1.0			
Date:	3-Dec-2010		Sheet		of
File:	D:\an\26_mig\l298\arduino\l298		NG-DW-00000000		DB:

El desarrollo del presente trabajo de investigación ha dado lugar a las siguientes patentes nacionales:

C.1. Sistema de control domótico programable con capacidad de gestión energética para cerramiento activo transparente o translúcido

Esta patente, concedida con el número ES2537130, describe un dispositivo de control domótico programable con capacidad de gestión energética para cerramiento o partición interior activo transparente o translúcido de un edificio.

Cabe destacar el hecho de que la patente se haya obtenido mediante la modalidad de examen previo, lo que da lugar a una patente *fuerte*, en la que difícilmente pueden impugnarse sus reivindicaciones una vez concedida. Es también reseñable que, según se ha considerado por parte de los examinadores, todas y cada una de las 14 reivindicaciones reclamadas poseen tanto novedad como capacidad inventiva.

Control domótico de un acrist. activo con cámara de agua circulante
para la reducción de la demanda energética de EECN

Anexo C: Patentes

Extracto del Documento de patente

19

OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 537 130**

21 Número de solicitud: 201331755

51 Int. Cl.:

G05B 15/02 (2006.01)

G05B 19/02 (2006.01)

E06B 3/67 (2006.01)

E04B 2/88 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN PREVIO

B2

22 Fecha de presentación:

02.12.2013

43 Fecha de publicación de la solicitud:

02.06.2015

Fecha de la concesión:

22.09.2015

45 Fecha de publicación de la concesión:

29.09.2015

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
(100.0%)**

**C/ Ramiro de Maeztu, 7
28040 Madrid (Madrid) ES**

72 Inventor/es:

**CLAROS MARFIL, Luis Jesús;
LAURET AGUIRREGABIRIA, Benito;
PADIAL MOLINA, Juan Francisco;
OVANDO VACAREZZA, Graciela;
LIROLA PÉREZ, Juan Miguel;
ARTACHO REINOSO, M^a José;
ZAMBRANA PINEDA, Antonio y
BENÍTEZ DÍAZ, Fernando**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

54 Título: **Sistema de control domótico programable con capacidad de gestión energética para cerramiento activo transparente o translúcido**

ES 2 537 130 B2

19

OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 537 130**

21 Número de solicitud: 201331755

57 Resumen:

Sistema de control domótico programable con capacidad de gestión energética para cerramiento activo transparente o translucido.

El sistema de control domótico programable (1) con capacidad de gestión energética para cerramiento (partición interior) activo transparente translucido de un edificio, comprende: una unidad de control programable (2); una unidad de gestión energética (3); una unidad de conexión de sensores (4); una unidad de gestión de actuadores (5); una unidad de registro de datos (6); una fuente de alimentación (7); una unidad de gestión de comunicaciones (8) que permite su conexión con una red exterior (13); un interfaz de usuario (9); una estación meteorológica (10); un concentrador de sensores (11) y un concentrador de actuadores (12), de manera que mediante dichos elementos y a partir de una serie de redes de sensores, el sistema de control de cerramiento o partición activo, materializado con un acristalamiento activo (14), es capaz de medir los parámetros higrotérmicos tanto interiores como exteriores, llevando a cabo las acciones de control oportunas para optimizar tanto la gestión energética del acristalamiento activo (14) como las condiciones de confort del interior del edificio.

FIG. 1

C.2. Cerramiento dinámico para edificaciones

Se trata de un cerramiento que permite reforzar y aumentar significativamente su resistencia frente a sobrepresiones ejercidas por el fluido circulante dentro de su cámara interna, incluso si superan varias veces la presión hidrostática. Al encontrarse el expediente de esta patente en tramitación (solicitud núm P201530064) no pueden ofrecerse más detalles.

Propiedades de los acristalamientos empleados en la simulación

D.1. Ventana con vidrio sencillo claro

Unit System : SI
 Name : TRNSYS 16 WIN LIB
 Desc : Simple, claro, 6 mm
 Window ID : 13903
 Tilt : 90.0
 Glazings : 1
 Frame : 1 Al no break
 Spacer : 1 Class1
 Total Height: 1500.0 mm
 Total Width : 1200.0 mm
 Glass Height: 1385.7 mm
 Glass Width : 1085.7 mm
 Mullion : None

Gap	Thick	Cond	dCond	Vis	dVis	Dens	dDens	Pr	dPr		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Angle	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Hemis
Tsol	0.789	0.789	0.787	0.781	0.771	0.749	0.702	0.595	0.358	0.000	0.709
Abs1	0.131	0.131	0.133	0.137	0.141	0.147	0.152	0.155	0.147	0.000	0.142
Abs2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rfsol	0.080	0.080	0.080	0.082	0.087	0.103	0.145	0.250	0.494	1.000	0.138
Rbsol	0.080	0.080	0.080	0.082	0.087	0.103	0.145	0.250	0.494	1.000	0.138
Tvis	0.890	0.890	0.889	0.886	0.879	0.859	0.811	0.695	0.432	0.000	0.812
Rfvis	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088	0.106	0.152	0.268	0.530	1.000	0.144
Rbvis	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088	0.106	0.152	0.268	0.530	1.000	0.144
SHGC	0.837	0.837	0.836	0.832	0.823	0.804	0.758	0.652	0.413	0.000	0.762
SC:	0.94										

Layer ID#	23903	0	0	0	0	0
Tir	0.000	0	0	0	0	0
Emis F	0.840	0	0	0	0	0
Emis B	0.840	0	0	0	0	0
Thickness(mm)	6.0	0	0	0	0	0
Cond(W/m2-K)	166.7	0	0	0	0	0
Spectral File	None	None	None	None	None	None

Overall and Center of Glass Ig U-values (W/m2-K)

Outdoor Temperature	-17.8 C	15.6 C	26.7 C	37.8 C
Solar	WdSpd	hcout	hrout	hin
(W/m2)	(m/s)	(W/m2-K)		
0	0.00	19.64	3.36	3.80
0	6.71	19.64	3.36	3.80
783	0.00	19.58	3.42	3.73
783	6.71	19.58	3.42	3.73

D.2. Ventana con vidrio sencillo reflectante

Unit System : SI
Name : TRNSYS 16 WIN LIB
Desc : Doble, reflectante, 6/8/6
Window ID : 13915
Tilt : 90.0
Glazings : 2
Frame : 1 Al no break 10.790
Spacer : 1 Class1 2.330 -0.010 0.138
Total Height: 1500.0 mm
Total Width : 1200.0 mm
Glass Height: 1385.7 mm
Glass Width : 1085.7 mm
Mullion : None

Gap	Thick	Cond	dCond	Vis	dVis	Dens	dDens	Pr	dPr
1 Air	8.0	0.02407	7.760	1.722	4.940	1.292	-0.0046	0.720	-0.0002
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Angle 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 Hemis

Tsol	0.377	0.377	0.371	0.363	0.353	0.333	0.293	0.216	0.101	0.000	0.312
Abs1	0.238	0.238	0.245	0.250	0.251	0.255	0.268	0.280	0.235	0.001	0.252
Abs2	0.062	0.062	0.063	0.064	0.065	0.065	0.064	0.056	0.041	0.000	0.061
Abs3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rfsol	0.322	0.322	0.320	0.322	0.331	0.346	0.375	0.447	0.622	0.999	0.364
Rbsol	0.334	0.334	0.332	0.332	0.335	0.346	0.375	0.450	0.617	1.000	0.368
Tvis	0.299	0.299	0.295	0.290	0.283	0.270	0.241	0.184	0.094	0.000	0.253
Rfvis	0.454	0.454	0.453	0.455	0.461	0.473	0.496	0.552	0.693	0.999	0.486
Rbvis	0.524	0.524	0.522	0.523	0.528	0.538	0.562	0.621	0.752	1.000	0.552
SHGC	0.466	0.466	0.461	0.455	0.445	0.427	0.388	0.309	0.175	0.000	0.402

SC: 0.58

Layer ID#	23905	23903	0	0	0	0
Tir	0.000	0.000	0	0	0	0
Emis F	0.840	0.840	0	0	0	0
Emis B	0.400	0.840	0	0	0	0
Thickness(mm)	6.0	6.0	0	0	0	0
Cond(W/m2-K)	166.7	166.7	0	0	0	0
Spectral File	None	None	None	None	None	None

Overall and Center of Glass Ig U-values (W/m2-K)

Outdoor Temperature	-17.8 C				15.6 C				26.7 C				37.8 C			
Solar (W/m2)	WdSpd (m/s)	hcout (W/m2-K)	hrout (W/m2-K)	hin (W/m2-K)	WdSpd (m/s)	hcout (W/m2-K)	hrout (W/m2-K)	hin (W/m2-K)	WdSpd (m/s)	hcout (W/m2-K)	hrout (W/m2-K)	hin (W/m2-K)	WdSpd (m/s)	hcout (W/m2-K)	hrout (W/m2-K)	hin (W/m2-K)
0	0.00	19.75	3.25	3.44	2.54	2.54	2.70	2.70	2.76	2.76	2.82	2.82	2.76	2.76	2.82	2.82
0	6.71	19.75	3.25	3.44	2.54	2.54	2.70	2.70	2.76	2.76	2.82	2.82	2.76	2.76	2.82	2.82
783	0.00	19.59	3.41	3.29	2.54	2.54	2.70	2.70	2.76	2.76	2.82	2.82	2.76	2.76	2.82	2.82
783	6.71	19.59	3.41	3.29	2.54	2.54	2.70	2.70	2.76	2.76	2.82	2.82	2.76	2.76	2.82	2.82

Window 5.2 v5.2.17 DOE-2 Data File : Multi Band Calculation

D.3. Ventana con vidrio laminar claro - SGG Stadip Clear 44-1

Unit System : SI
 Name : USER TESIS LIB
 Desc : Simple, claro, 44-1mm SGG Stadip Clear
 Window ID : 14001
 Tilt : 90.0
 Glazings : 1
 Frame : 1 Al no break 10.790
 Spacer : 1 Class1 2.330 -0.010 0.138
 Total Height: 1500.0 mm
 Total Width : 1200.0 mm
 Glass Height: 1385.7 mm
 Glass Width : 1085.7 mm
 Mullion : None

Gap	Thick	Cond	dCond	Vis	dVis	Dens	dDens	Pr	dPr
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Angle	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Hemis
Tsol	0.750	0.749	0.746	0.740	0.729	0.707	0.661	0.558	0.336	0.000	0.670
Abs1	0.181	0.171	0.173	0.178	0.184	0.190	0.196	0.195	0.177	0.000	0.183
Abs2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rfsol	0.070	0.080	0.080	0.082	0.087	0.103	0.144	0.246	0.488	1.000	0.137
Rbsol	0.070	0.080	0.080	0.082	0.087	0.103	0.144	0.246	0.488	1.000	0.137
Tvis	0.882	0.882	0.881	0.878	0.870	0.850	0.802	0.686	0.426	0.000	0.803
Rfvis	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088	0.106	0.152	0.266	0.527	1.000	0.144
Rbvis	0.080	0.080	0.080	0.082	0.088	0.106	0.152	0.266	0.527	1.000	0.144
SHGC	0.805	0.801	0.799	0.795	0.785	0.765	0.721	0.618	0.390	0.000	0.726

SC: 0.925

Layer ID#	23801	0	0	0	0
Tir	0.000	0	0	0	0
Emis F	0.837	0	0	0	0
Emis B	0.837	0	0	0	0
Thickness(mm)	8.4	0	0	0	0
Cond(W/m2-K)	708.0	0	0	0	0
Spectral File	None	None	None	None	None

None

Overall and Center of Glass Ig U-values (W/m2-K)

Outdoor Temperature	-17.8 C	15.6 C	26.7 C	37.8 C
Solar WdSpd	0.00	6.71	0.00	6.71
hcout	19.64	19.64	19.61	19.61
hrou	3.36	3.36	3.39	3.39
hin	3.82	3.82	3.79	3.79
0	5.42	5.42	5.42	5.42
0	5.42	5.42	5.42	5.42
783	5.42	5.42	5.42	5.42
783	5.42	5.42	5.42	5.42

D.4. Ventana con vidrio doble claro 6/8/6

Unit System : SI
 Name : TRNSYS 16 WIN LIB
 Desc : Doble, claro, 6/8/6
 Window ID : 13911
 Tilt : 90.0
 Glazings : 2
 Frame : 1 Al no break 10.790
 Spacer : 1 Class1 2.330 -0.010 0.138
 Total Height: 1500.0 mm
 Total Width : 1200.0 mm
 Glass Height: 1385.7 mm
 Glass Width : 1085.7 mm
 Mullion : None

Gap	Thick	Cond	dCond	Vis	dVis	Dens	dDens	Pr	dPr
1 Air	8.0	0.02407	7.760	1.722	4.940	1.292	-0.0046	0.720	-0.0002
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Angle	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Hemis
Tsol	0.627	0.627	0.623	0.615	0.599	0.568	0.504	0.377	0.170	0.000	0.529
Abs1	0.139	0.139	0.141	0.145	0.151	0.159	0.168	0.180	0.182	0.000	0.156
Abs2	0.104	0.104	0.105	0.107	0.110	0.111	0.109	0.098	0.070	0.000	0.104
Abs3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rfsol	0.130	0.130	0.130	0.132	0.139	0.162	0.218	0.344	0.578	1.000	0.200
Rbsol	0.130	0.130	0.130	0.132	0.139	0.162	0.218	0.344	0.578	1.000	0.200
Tvis	0.797	0.797	0.795	0.791	0.778	0.747	0.674	0.520	0.260	0.000	0.694
Rfvis	0.144	0.144	0.144	0.147	0.157	0.185	0.255	0.407	0.667	1.000	0.230
Rbvis	0.144	0.144	0.144	0.147	0.157	0.185	0.255	0.407	0.667	1.000	0.230
SHGC	0.722	0.722	0.720	0.714	0.701	0.672	0.609	0.478	0.254	0.000	0.629

SC: 0.83

Layer ID#	23903	23903	0	0	0	0
Tir	0.000	0.000	0	0	0	0
Emis F	0.840	0.840	0	0	0	0
Emis B	0.840	0.840	0	0	0	0
Thickness(mm)	6.0	6.0	0	0	0	0
Cond(W/m2-K)	166.7	166.7	0	0	0	0
Spectral File	None	None	None	None	None	None

None

Overall and Center of Glass Ig U-values (W/m2-K)

Outdoor Temperature	-17.8 C	15.6 C	26.7 C	37.8 C
Solar WdSpd hcout hrout hin				
(W/m2) (m/s) (W/m2-K)				
0	0.00 19.73 3.27 3.49 2.93 2.93 3.13 3.13 3.21 3.21 3.28 3.28			
0	6.71 19.73 3.27 3.49 2.93 2.93 3.13 3.13 3.21 3.21 3.28 3.28			
783	0.00 19.63 3.37 3.30 2.93 2.93 3.13 3.13 3.21 3.21 3.28 3.28			
783	6.71 19.63 3.37 3.30 2.93 2.93 3.13 3.13 3.21 3.21 3.28 3.28			

D.5. Ventana con vidrio doble de control solar 6/8/6

Unit System : SI
 Name : TRNSYS 16 WIN LIB
 Desc : Doble, control solar, 6/8/6
 Window ID : 13917
 Tilt : 90.0
 Glazings : 2
 Frame : 1 Al no break 10.790
 Spacer : 1 Class1 2.330 -0.010 0.138
 Total Height: 1500.0 mm
 Total Width : 1200.0 mm
 Glass Height: 1385.7 mm
 Glass Width : 1085.7 mm
 Mullion : None
 Gap Thick Cond dCond Vis dVis Dens dDens Pr dPr
 1 Air 8.0 0.02407 7.760 1.722 4.940 1.292 -0.0046 0.720 -0.0002
 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 Angle 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 Hemis
 Tsol 0.260 0.260 0.255 0.250 0.243 0.229 0.200 0.146 0.067 0.000 0.214
 Abs1 0.586 0.586 0.592 0.594 0.590 0.585 0.581 0.552 0.415 0.001 0.568
 Abs2 0.043 0.043 0.043 0.044 0.045 0.045 0.043 0.038 0.027 0.000 0.042
 Abs3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 Abs4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 Abs5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 Abs6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 Rfsol 0.111 0.111 0.109 0.112 0.123 0.141 0.175 0.264 0.491 0.999 0.166
 Rbsol 0.248 0.248 0.246 0.247 0.254 0.270 0.308 0.401 0.597 1.000 0.297
 Tvis 0.365 0.365 0.360 0.353 0.344 0.327 0.288 0.212 0.101 0.000 0.304
 Rfvis 0.106 0.106 0.104 0.107 0.118 0.136 0.173 0.264 0.494 0.999 0.163
 RBvis 0.260 0.260 0.259 0.262 0.273 0.294 0.343 0.455 0.674 1.000 0.325
 SHGC 0.405 0.405 0.402 0.398 0.390 0.376 0.345 0.281 0.167 0.000 0.355
 SC: 0.52

Layer ID#	23906	23903	0	0	0	0
Tir	0.000	0.000	0	0	0	0
Emis F	0.840	0.840	0	0	0	0
Emis B	0.400	0.840	0	0	0	0
Thickness(mm)	6.0	6.0	0	0	0	0
Cond(W/m2-K)	166.7	166.7	0	0	0	0
Spectral File	None	None	None	None	None	None
None						

Overall and Center of Glass Ig U-values (W/m2-K)

Outdoor Temperature	-17.8 C	15.6 C	26.7 C	37.8 C
Solar WdSpd hcout hrout hin				
(W/m2) (m/s) (W/m2-K)				
0	0.00	19.75	3.25	3.44
0	6.71	19.75	3.25	3.44
783	0.00	19.39	3.62	3.22
783	6.71	19.39	3.62	3.22

D.6. Ventana equivalente a vidrio activo

Unit System : SI

Name : TRNSYS 16 WIN LIB

Desc : Doble, reflectante, 6/8/6

Window ID : 14956

Tilt : 90.0

Glazings : 2

Frame : 1 Al no break 10.790

Spacer : 1 Class1 2.330 -0.010 0.138

Total Height: 1500.0 mm

Total Width : 1200.0 mm

Glass Height: 1385.7 mm

Glass Width : 1085.7 mm

Mullion : None

Gap	Thick	Cond	dCond	Vis	dVis	Dens	dDens	Pr	dPr		
1 Air	8.0	0.02407	7.760	1.722	4.940	1.292	-0.0046	0.720	-0.0002		
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Angle	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	Hemis
Tsol	0.209	0.209	0.206	0.202	0.196	0.185	0.163	0.120	0.056	0.000	0.173
Abs1	0.238	0.238	0.245	0.250	0.251	0.255	0.268	0.280	0.235	0.001	0.252
Abs2	0.062	0.062	0.063	0.064	0.065	0.065	0.064	0.056	0.041	0.000	0.061
Abs3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abs6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rfsol	0.322	0.322	0.320	0.322	0.331	0.346	0.375	0.447	0.622	0.999	0.364
Rbsol	0.334	0.334	0.332	0.332	0.335	0.346	0.375	0.450	0.617	1.000	0.368
Tvis	0.299	0.299	0.295	0.290	0.283	0.270	0.241	0.184	0.094	0.000	0.253
Rfvis	0.454	0.454	0.453	0.455	0.461	0.473	0.496	0.552	0.693	0.999	0.486
Rbvis	0.524	0.524	0.522	0.523	0.528	0.538	0.562	0.621	0.752	1.000	0.552
SHGC	0.233	0.233	0.231	0.228	0.223	0.214	0.194	0.155	0.09	0.000	0.201

SC: 0.58

Layer ID#	23905	23903	0	0	0	0
Tir	0.000	0.000	0	0	0	0
Emis F	0.840	0.840	0	0	0	0
Emis B	0.400	0.840	0	0	0	0
Thickness(mm)	6.0	6.0	0	0	0	0
Cond(W/m2-K)	166.7	166.7	0	0	0	0
Spectral File	None	None	None	None	None	None
None						

Overall and Center of Glass Ig U-values (W/m2-K)

Outdoor Temperature -17.8 C 15.6 C 26.7 C 37.8 C

Solar	WdSpd	hcout	hrout	hin								
(W/m2)	(m/s)	(W/m2-K)										
0	0.00	19.75	3.25	3.44	2.54	2.54	2.70	2.70	2.76	2.76	2.82	2.82
0	6.71	19.75	3.25	3.44	2.54	2.54	2.70	2.70	2.76	2.76	2.82	2.82
783	0.00	19.59	3.41	3.29	2.54	2.54	2.70	2.70	2.76	2.76	2.82	2.82
783	6.71	19.59	3.41	3.29	2.54	2.54	2.70	2.70	2.76	2.76	2.82	2.82

Resultados experimentales

En el presente anexo se incluyen las gráficas correspondientes a los datos experimentales obtenidos durante los diferentes ensayos desarrollados a lo largo de la tesis.

E.1. Ensayo 24/05/2013 - Funcionamiento continuo

Figura E.1: Funcionamiento continuo de la bomba

E.2. Ensayos en Condiciones de demanda de calefacción

E.2.1. Ensayos - Condiciones de demanda de calefacción - Radiación alta

Figura E.2: Temperaturas en ambos módulos solares con valores de radiación solar alta

Figura E.3: Temperaturas en ambos módulos solares

E.2.2. Ensayos - Condiciones de demanda de calefacción - Radiación media

Figura E.4: Temperaturas en ambos módulos solares con valores de radiación solar media

E.2.3. Ensayos - Condiciones de demanda de calefacción - Radiación baja

Figura E.5: Temperaturas en ambos módulos solares con valores de radiación solar baja

Figura E.6: Temperaturas en ambos módulos solares

Figura E.7: Temperaturas en ambos módulos solares

E.2.4. Ensayo 31/05/2013 vidrio activo triple - vidrio sencillo

Figura E.8: Temperaturas en ambos módulos solares

E.3. Ensayos en condiciones de demanda de refrigeración

E.3.1. Ensayo 29/08/2013 - Vidrio activo con cámara de agua y cámara de aire - Vidrio sencillo

Figura E.9: Tint-Tamb en ambos módulos solares

E.3.2. Ensayo 30/08/2013 - Vidrio activo con cámara de agua y cámara de aire - Vidrio sencillo

Figura E.10: Tint-Tamb en ambos módulos solares

F

**Datos de funcionamiento de la bomba de calor
Trane GEH035**

F.1. Datos para funcionamiento en modo calefacción

[illegible]

F.2. Datos para funcionamiento en modo refrigeración


```

1  0.7500→1.000 !Normalized air flow rate→→→→
2  18→20→22→24→26!Return air wet bulb (C)→→→
3  26→28→30→32→!Return air dry bulb (C)→→→
4  21→25→27→30→35→40→46 !Outdoor air dry bulb (C)
5  1.1750→1.2067→0.8000 ! - Normalized data for Total Capacity , Sensible Capacity y
Power input - Air-Air Heat Pump - Mitsubishi MUZ-GE50VA2/VAD - Cooling performance
data
6  1.1250→1.1553→0.8399
7  1.0792→1.1093→0.8797
8  1.0396→1.0660→0.9203
9  0.9792→0.7522→0.9797
10 0.9000→0.9226→1.0399
11 0.8292→0.8523→1.0797
12 1.1750→1.3285→0.8000
13 1.1250→1.2716→0.8399
14 1.0792→1.2202→0.8797
15 1.0396→1.1742→0.9203
16 0.9792→1.1066→0.9797
17 0.9000→1.0173→1.0399
18 0.8292→0.9389→1.0797
19 1.1750→1.4502→0.8000
20 1.1250→1.3880→0.8399
21 1.0792→1.4665→0.8797
22 1.0396→1.2825→0.9203
23 0.9792→1.2094→0.9797
24 0.9000→1.1093→1.0399
25 0.8292→1.0227→1.0797
26 1.1750→1.5260→0.8000
27 1.1250→1.4610→0.8399
28 1.0792→1.4015→0.8797
29 1.0396→1.3501→0.9203
30 0.9792→1.2716→0.9797
31 0.9000→1.1688→1.0399
32 0.8292→1.0768→1.0797
33 1.2250→1.0660→0.8399
34 1.1750→1.0227→0.8899
35 1.1396→0.9930→0.9101
36 1.1000→0.9578→0.9500
37 1.0292→0.8956→1.0203
38 0.9604→0.8360→1.0703
39 0.8896→0.7738→1.1297
40 1.2250→1.1932→0.8399
41 1.1750→1.1445→0.8899
42 1.1396→1.1093→0.9101
43 1.1000→1.0714→0.9500
44 1.0292→1.0038→1.0203
45 0.9604→0.9361→1.0703
46 0.8896→0.8658→1.1297
47 1.2250→1.3203→0.8399
48 1.1750→1.2662→0.8899
49 1.1396→1.2284→0.9101
50 1.1000→1.1851→0.9500
51 1.0292→1.1093→1.0203
52 0.9604→1.0335→1.0703
53 0.8896→0.9605→1.1297
54 1.2250→1.4475→0.8399
55 1.1750→1.3880→0.8899
56 1.1396→1.3474→0.9101
57 1.1000→1.2987→0.9500
58 1.0292→1.2175→1.0203
59 0.9604→1.1337→1.0703
60 0.8896→1.0525→1.1297
61 1.2750→0.9118→0.8703
62 1.2292→0.8793→0.9250
63 1.2000→0.8577→0.9500
64 1.1500→0.8225→0.9899
65 1.0896→0.7792→1.0601
66 1.0208→0.7278→1.1203
67 0.9500→0.6791→1.1601
68 1.2750→1.0444→0.8703
69 1.2292→1.0065→0.9250
70 1.2000→0.9821→0.9500
71 1.1500→0.9416→0.9899

```

72 1.0896→0.8929→1.0601
73 1.0208→0.8333→1.1203
74 0.9500→0.7765→1.1601
75 1.2750→1.1769→0.8703
76 1.2292→1.1337→0.9250
77 1.2000→1.1066→0.9500
78 1.1500→1.0606→0.9899
79 1.0896→1.0038→1.0601
80 1.0208→0.9416→1.1203
81 0.9500→0.8766→1.1601
82 1.2750→1.3068→0.8703
83 1.2292→1.2608→0.9250
84 1.2000→1.2311→0.9500
85 1.1500→1.1797→0.9899
86 1.0896→1.1174→1.0601
87 1.0208→1.0471→1.1203
88 0.9500→0.9740→1.1601
89 1.3396→0.7495→0.9101
90 1.2896→0.7197→0.9601
91 1.2604→0.7035→0.9899
92 1.2208→0.6818→1.0399
93 1.1500→0.6412→1.1000
94 1.0792→0.6034→1.1500
95 1.0208→0.5709→1.2000
96 1.3396→0.8874→0.9101
97 1.2896→0.8550→0.9601
98 1.2604→0.8333→0.9899
99 1.2208→0.8090→1.0399
100 1.1500→0.7630→1.1000
101 1.0792→0.7143→1.1500
102 1.0208→0.6764→1.2000
103 1.3396→1.0254→0.9101
104 1.2896→0.9876→0.9601
105 1.2604→0.9659→0.9899
106 1.2208→0.9361→1.0399
107 1.1500→0.8820→1.1000
108 1.0792→0.8279→1.1500
109 1.0208→0.7819→1.2000
110 1.3396→1.1661→0.9101
111 1.2896→1.1228→0.9601
112 1.2604→1.0958→0.9899
113 1.2208→1.0606→1.0399
114 1.1500→1.0011→1.1000
115 1.0792→0.9389→1.1500
116 1.0208→0.8874→1.2000
117 1.3792→0.5547→0.9601
118 1.3396→0.5384→1.0101
119 1.3208→0.5303→1.0399
120 1.2104→0.4870→1.1399
121 1.1396→0.4600→1.1899
122 1.0708→0.4302→1.2399
123 1.3792→0.6981→0.9601
124 1.3396→0.6791→1.0101
125 1.3396→0.6791→1.0101
126 1.3208→0.6683→1.0399
127 1.2792→0.6494→1.0703
128 1.2104→0.6142→1.1399
129 1.1396→0.5763→1.1899
130 1.0708→0.5411→1.2399
131 1.3792→0.8415→4.4730
132 1.3396→0.8171→1.0101
133 1.3208→0.8063→1.0399
134 1.2854→0.7819→1.0703
135 1.2104→0.7386→1.1399
136 1.1396→0.6953→1.1899
137 1.0708→0.6521→1.2399
138 1.3792→0.9848→0.9601
139 1.3396→0.9578→1.0101
140 1.3208→0.9416→1.0399
141 1.2792→0.9145→1.0703
142 1.2104→0.8631→1.1399
143 1.1396→0.8144→1.1899
144 1.0708→0.7630→1.2399

145 1.1750→1.2067→0.8000
146 1.1250→1.1553→0.8399
147 1.0792→1.1093→0.8797
148 1.0396→1.0660→0.9203
149 0.9792→0.7522→0.9797
150 0.9000→0.9226→1.0399
151 0.8292→0.8523→1.0797
152 1.1750→1.3285→0.8000
153 1.1250→1.2716→0.8399
154 1.0792→1.2202→0.8797
155 1.0396→1.1742→0.9203
156 0.9792→1.1066→0.9797
157 0.9000→1.0173→1.0399
158 0.8292→0.9389→1.0797
159 1.1750→1.4502→0.8000
160 1.1250→1.3880→0.8399
161 1.0792→1.4665→0.8797
162 1.0396→1.2825→0.9203
163 0.9792→1.2094→0.9797
164 0.9000→1.1093→1.0399
165 0.8292→1.0227→1.0797
166 1.1750→1.5260→0.8000
167 1.1250→1.4610→0.8399
168 1.0792→1.4015→0.8797
169 1.0396→1.3501→0.9203
170 0.9792→1.2716→0.9797
171 0.9000→1.1688→1.0399
172 0.8292→1.0768→1.0797
173 1.2250→1.0660→0.8399
174 1.1750→1.0227→0.8899
175 1.1396→0.9930→0.9101
176 1.1000→0.9578→0.9500
177 1.0292→0.8956→1.0203
178 0.9604→0.8360→1.0703
179 0.8896→0.7738→1.1297
180 1.2250→1.1932→0.8399
181 1.1750→1.1445→0.8899
182 1.1396→1.1093→0.9101
183 1.1000→1.0714→0.9500
184 1.0292→1.0038→1.0203
185 0.9604→0.9361→1.0703
186 0.8896→0.8658→1.1297
187 1.2250→1.3203→0.8399
188 1.1750→1.2662→0.8899
189 1.1396→1.2284→0.9101
190 1.1000→1.1851→0.9500
191 1.0292→1.1093→1.0203
192 0.9604→1.0335→1.0703
193 0.8896→0.9605→1.1297
194 1.2250→1.4475→0.8399
195 1.1750→1.3880→0.8899
196 1.1396→1.3474→0.9101
197 1.1000→1.2987→0.9500
198 1.0292→1.2175→1.0203
199 0.9604→1.1337→1.0703
200 0.8896→1.0525→1.1297
201 1.2750→0.9118→0.8703
202 1.2292→0.8793→0.9250
203 1.2000→0.8577→0.9500
204 1.1500→0.8225→0.9899
205 1.0896→0.7792→1.0601
206 1.0208→0.7278→1.1203
207 0.9500→0.6791→1.1601
208 1.2750→1.0444→0.8703
209 1.2292→1.0065→0.9250
210 1.2000→0.9821→0.9500
211 1.1500→0.9416→0.9899
212 1.0896→0.8929→1.0601
213 1.0208→0.8333→1.1203
214 0.9500→0.7765→1.1601
215 1.2750→1.1769→0.8703
216 1.2292→1.1337→0.9250
217 1.2000→1.1066→0.9500

218 1.1500→1.0606→0.9899
219 1.0896→1.0038→1.0601
220 1.0208→0.9416→1.1203
221 0.9500→0.8766→1.1601
222 1.2750→1.3068→0.8703
223 1.2292→1.2608→0.9250
224 1.2000→1.2311→0.9500
225 1.1500→1.1797→0.9899
226 1.0896→1.1174→1.0601
227 1.0208→1.0471→1.1203
228 0.9500→0.9740→1.1601
229 1.3396→0.7495→0.9101
230 1.2896→0.7197→0.9601
231 1.2604→0.7035→0.9899
232 1.2208→0.6818→1.0399
233 1.1500→0.6412→1.1000
234 1.0792→0.6034→1.1500
235 1.0208→0.5709→1.2000
236 1.3396→0.8874→0.9101
237 1.2896→0.8550→0.9601
238 1.2604→0.8333→0.9899
239 1.2208→0.8090→1.0399
240 1.1500→0.7630→1.1000
241 1.0792→0.7143→1.1500
242 1.0208→0.6764→1.2000
243 1.3396→1.0254→0.9101
244 1.2896→0.9876→0.9601
245 1.2604→0.9659→0.9899
246 1.2208→0.9361→1.0399
247 1.1500→0.8820→1.1000
248 1.0792→0.8279→1.1500
249 1.0208→0.7819→1.2000
250 1.3396→1.1661→0.9101
251 1.2896→1.1228→0.9601
252 1.2604→1.0958→0.9899
253 1.2208→1.0606→1.0399
254 1.1500→1.0011→1.1000
255 1.0792→0.9389→1.1500
256 1.0208→0.8874→1.2000
257 1.3792→0.5547→0.9601
258 1.3396→0.5384→1.0101
259 1.3208→0.5303→1.0399
260 1.2104→0.4870→1.1399
261 1.1396→0.4600→1.1899
262 1.0708→0.4302→1.2399
263 1.3792→0.6981→0.9601
264 1.3396→0.6791→1.0101
265 1.3396→0.6791→1.0101
266 1.3208→0.6683→1.0399
267 1.2792→0.6494→1.0703
268 1.2104→0.6142→1.1399
269 1.1396→0.5763→1.1899
270 1.0708→0.5411→1.2399
271 1.3792→0.8415→4.4730
272 1.3396→0.8171→1.0101
273 1.3208→0.8063→1.0399
274 1.2854→0.7819→1.0703
275 1.2104→0.7386→1.1399
276 1.1396→0.6953→1.1899
277 1.0708→0.6521→1.2399
278 1.3792→0.9848→0.9601
279 1.3396→0.9578→1.0101
280 1.3208→0.9416→1.0399
281 1.2792→0.9145→1.0703
282 1.2104→0.8631→1.1399
283 1.1396→0.8144→1.1899
284 1.0708→0.7630→1.2399
285
286
287

Datos de funcionamiento de la bomba de calor Trane GEH035

G.1. Datos para funcionamiento en modo calefacción


```

1  0.8070→1.0000→→→→→!Normalized Airflow Steps
2  0.6429→0.7857→0.8929→1.000→1.0357→1.0833!Normalized Waterflow Steps
3  -3.89→0.00→→7.22→→12.78→20.00→23.89!Entering Liquid/Water Temperatures (C)
4  0.5947→0.9085→→→→→!Normalized Rated Heating Capacity and Normalized Rated Heating
   Power at 0.8070, 0.6429, and -3.89 (C)
5  1.3231→0.9301
6  0.7774→0.9731
7  0.8732→1.0162
8  0.9935→1.0851
9  1.0692→1.1238
10 1.1939→1.1970
11 0.6036→0.9085
12 0.6660→0.9344
13 0.7885→0.9731
14 0.8888→1.0205
15 1.0157→1.0937
16 1.1071→1.1368
17 1.2184→1.2056
18 0.6081→0.9128
19 0.6705→0.9344
20 0.7952→0.9774
21 0.8954→1.0205
22 1.0246→1.0937
23 1.1071→1.1454
24 1.2318→1.2143
25 0.6126→0.9128
26 0.6772→0.9387
27 0.7997→0.9817
28 0.9021→1.0248
29 1.0313→1.0980
30 1.1160→1.1497
31 1.2407→1.2186
32 0.6148→0.9128
33 0.6794→0.9387
34 0.8019→0.9817
35 0.9044→1.0291
36 1.0335→1.0980
37 1.1182→1.1497
38 1.2429→1.2186
39 0.6148→0.9085
40 0.6816→0.9387
41 0.8041→0.9817
42 0.9088→0.9817
43 1.0380→1.0980
44 1.1204→1.1454
45 1.2474→1.2229
46 0.6014→0.8275
47 1.3378→0.8471
48 0.7860→0.8863
49 0.8829→0.9255
50 1.0045→0.9882
51 1.0811→1.0235
52 1.2072→1.0902
53 0.6104→0.8275
54 0.6734→0.8510
55 0.7973→0.8863
56 0.8986→0.9294
57 1.0270→0.9961
58 1.1194→1.0353
59 1.2320→1.0980
60 0.6149→0.8314
61 0.6779→0.8510
62 0.8041→0.8902
63 0.9054→0.9294
64 1.0360→0.9961
65 1.1194→1.0431
66 1.2455→1.1059
67 0.6194→0.8314
68 0.6847→0.8549
69 0.8086→0.8941
70 0.9122→0.9333
71 1.0428→1.0000
72 1.1284→1.0471

```

73 1.2545→1.1098
74 0.6216→0.8314
75 0.6869→0.8549
76 0.8108→0.8941
77 0.9144→0.9373
78 1.0450→1.0000
79 1.1306→1.0471
80 1.2568→1.1098
81 0.6216→0.8275
82 0.6892→0.8549
83 0.8131→0.8941
84 0.9189→0.8941
85 1.0495→1.0000
86 1.1329→1.0431
87 1.2613→1.1137 !Normalized Rated Heating Capacity and Normalized Rated Heating Power
at 1, 1.0357, and 23.89 (C)
88
89 !These values are based on published catalog data from a TRANE GEH035 water source
heat pump, normalized at 1140 cfm, 8.4 gpm (ISO 13256-1)
90
91
92
93

G.2. Factores de corrección de datos para funcionamiento en modo calefacción según la tem- peratura del aire


```
1  11.67 14.44 17.22 20.00 22.78 25.56 28.33 ...! Values of Entering Air Dry-Bulb
   Temperature (C)
2  1.0240→0.8400! Multipliers for Heating Capacity and Power at 11.67
3  1.0170→0.8930
4  1.0090→0.9470
5  1.0000→1.0000
6  0.9950→1.0610
7  0.9830→1.1170
8  0.9740→1.1790! Multipliers for Heating Capacity and Power at 28.33
9
```


G.3. Datos para funcionamiento en modo refrigeración


```
1 0.8070→1.0000→→→→!Normalized Airflow Steps
2 0.6429→0.7857→0.8929→1.000→1.0357→1.0833!Normalized Waterflow Steps
3 12.78→20.00→23.89→30.00→35→40.56→43.33!Entering Liquid/Water
  Temperatures (C)
4 1.0377→0.9133→0.8149
5 0.9855→0.9133→0.8149
6 0.9557→0.8877→0.9358
7 0.9067→0.8726→1.0030
8 0.8637→0.8485→1.1149
9 0.8128→0.8278→1.2179
10 0.7857→0.8031→1.3523
11 1.0434→0.9162→0.7881
12 0.9912→0.8902→0.9090
13 0.9614→0.8754→0.9761
14 0.9124→0.8513→1.0881
15 0.8696→0.8307→1.1911
16 0.8187→0.8059→1.3254
17 0.7919→0.7924→1.3970
18 1.0467→0.9171→0.7746
19 0.9942→0.8914→0.8955
20 0.9644→0.8764→0.9627
21 0.9154→0.8523→1.0791
22 0.8723→0.8316→1.1821
23 0.8214→0.8069→1.3120
24 0.7946→0.7937→1.3836
25 1.0497→0.9190→0.7657
26 0.9969→0.8933→0.8866
27 0.9671→0.8783→0.9537
28 0.9175→0.8541→1.0657
29 0.8745→0.8335→1.1687
30 0.8236→0.8087→1.2985
31 0.7968→0.7956→1.3746
32 1.0507→0.9196→0.7612
33 0.9977→0.8936→0.8821
34 0.9676→0.8789→0.9493
35 0.9183→0.8545→1.0612
36 0.8753→0.8338→1.1687
37 0.8241→0.8090→1.2985
38 0.7973→0.7959→1.3702
39 1.0518→0.9196→0.7567
40 0.9988→0.8939→0.8776
41 0.9687→0.8789→0.9448
42 0.9192→0.8548→1.0612
43 0.8761→0.8341→1.1642
44 0.8249→0.8094→1.2940
45 0.7981→0.7962→1.3657
46 1.0889→1.0486→0.8125
47 1.0889→1.0486→0.8125
48 1.0341→1.0191→0.9330
49 1.0028→1.0019→1.0000
50 0.9514→0.9742→1.1116
51 0.9063→0.9504→1.2143
52 0.8528→0.9220→1.3482
53 1.0949→1.0519→0.7857
54 1.0401→1.0220→0.9063
55 1.0088→1.0051→0.9732
56 0.9574→0.9774→1.0848
57 0.9125→0.9537→1.1875
58 0.8591→0.9253→1.3214
59 0.8310→0.9098→1.3929
60 1.0983→1.0529→0.7723
61 1.0432→1.0234→0.8929
62 1.0119→1.0062→0.9598
63 0.9605→0.9785→1.0759
64 0.9153→0.9548→1.1786
65 0.8619→0.9264→1.3080
66 0.8338→0.9112→1.3795
67 1.1014→1.0551→0.7634
68 1.0460→1.0256→0.8839
69 1.0148→1.0083→0.9509
70 0.9628→0.9807→1.0625
71 0.9176→0.9569→1.1652
72 0.8642→0.9285→1.2946
```

73 0.8361→0.9134→1.3705
74 1.1026→1.0558→0.7589
75 1.0469→1.0260→0.8795
76 1.0153→1.0091→0.9464
77 0.9636→0.9810→1.0580
78 0.9185→0.9573→1.1652
79 0.8648→0.9289→1.2946
80 0.8366→0.9138→1.3661
81 1.1037→1.0558→0.7545
82 1.0480→1.0263→0.8750
83 1.0165→1.0091→0.9420
84 0.9645→0.9814→1.0580
85 0.9193→0.9576→1.1607
86 0.8656→0.9292→1.2902
87 0.8375→0.9141→1.3616

88

89

90 !These values are based on published catalog data from a TRANE GEH035 water source
heat pump, normalized at 1140 cfm, 8.4 gpm (ISO 13256-1)

91

G.4. Factores de corrección de datos para funcionamiento en modo refrigeración según la tem- peratura del aire


```

1  18.6667→21.4444→24.2222→27.0000→29.7778→→→→→!Dry bulb
   temperature (C)
2  9.6667→13.5000→15.7222→17.3333→19.0000→22.2778→25.0556→!Wet
   bulb temperature (C)
3  0.924→0.997→1.0070
4  0.925→0.799→1.0070
5  0.926→0.589→1.0070
6  0.959→0.429→1.0040
7  1→0→1.0000
8  1.092→0→1.0920
9  1.175→0→1.1750
10 0.924→1.066→1.0070
11 0.925→1.034→1.0070
12 0.926→0.831→1.0070
13 0.959→0.676→1.0040
14 1→0.507→1.0000
15 1.092→0→1.0920
16 1.175→0→1.1750
17 0.924→1.136→1.0070
18 0.925→1.137→1.0070
19 0.926→1.072→1.0070
20 0.959→0.919→1.0040
21 1→0.752→1.0000
22 1.092→0.413→1.0920
23 1.175→0→1.1750
24 0.924→2→1.0070
25 0.925→2→1.0070
26 0.926→2→1.0070
27 0.959→1.16→1.0040
28 1→1→1.0000
29 1.092→0.662→1.0920
30 1.175→0.363→1.1750
31 0.924→2→1.0070
32 0.925→2→1.0070
33 0.926→2→1.0070
34 0.959→2→1.0040
35 1→1.239→1.0000
36 1.092→0.909→1.0920
37 1.175→0.615→1.1750
38
39
40
41 →→→→→!These values are based on published catalog data from a
   TRANE GEH 035 water source heat pump, normalized at 1140
   cfm, 8.4 gpm (ISO 13256-1)
42

```

Ecuaciones empleadas en la simulación del taller

H.1. Ecuaciones de Control de los Modos - Escenario 4-1

Las ecuaciones utilizadas en el elemento *equation* denominado Modo Control en el Escenario 4-1 son las siguientes:

Control calefacción

$$CAL_ON = TERMOS_CAL_ENT * HORARIO_ACOND_ENT \quad (H.1)$$

Control refrigeración

$$REF_ON = TERMOS_REF_ENT * HORARIO_ACOND_ENT \quad (H.2)$$

Control ventilación sin acondicionamiento

$$\begin{aligned} DAMPER_{BC} = & (GT(HUM_REL_INT_ENT, 60) * 0.15 \\ & + (1 - GT(HUM_REL_INT_ENT, 60)) * 0.1) * HORARIO_ACOND_ENT \end{aligned} \quad (H.3)$$

Condiciones de Modo Apagado

$$MODO_APGD = AND(EQL(CAL_ON, 0), EQL(REF_ON, 0)) \quad (H.4)$$

Condiciones de act. del Modo Calefacción Asistida

$$MODO_CAL_ASIS = EQL(TIME, 0) * 0 + (1 - EQL(TIME, 0)) * EQL(CAL_ON, 1) \quad (H.5)$$

Condiciones de act. del Modo Refrigeración

$$MODO_REF = EQL(TIME, 0) * 0 + (1 - EQL(TIME, 0)) * EQL(REF_ON, 1) \quad (H.6)$$

Condiciones de act. de la bomba impulsora B_GEO

$$B_GEO = EQL(MODO_REF, 1) * 1 + EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \quad (H.7)$$

Condiciones de act. de la bomba de retorno B_RET_GEO

$$B_RET_GEO = EQL(MODO_REF, 1) * 1 + EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \quad (H.8)$$

Condiciones de act. de la bomba de retorno B_RET_BC

$$B_RET_BC = EQL(MODO_REF, 1) * 1 + EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \quad (H.9)$$

Condiciones de act. de la bomba impulsora B_DEP_VIDRIO

$$B_DEP_VIDRIO = EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 + EQL(MODO_REF, 1) * 1 \quad (H.10)$$

Condiciones de act. de la bomba impulsora B_VIDRIO_DEP

$$B_VIDRIO_DEP = EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 + EQL(MODO_REF, 1) * 1 \quad (H.11)$$

Condiciones de reg. de la vál. divisora DIV_VIDRIO

$$DIV_VIDRIO = EQL(MODO_REF, 1) * 1 + EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \quad (H.12)$$

Condiciones de activación del vidrio activo

$$VID_ON = OR(EQL(MODO_CAL_ASIS, 1), EQL(MODO_REF, 1)) \quad (H.13)$$

Asignación del ID del vidrio activo

$$WINDOW_ID = EQL(VID_ON, 1) * 14956 + NE(VID_ON, 1) * 13903 \quad (H.14)$$

H.2. Ecuaciones de Control de los Modos - Escenario 4-2

Las ecuaciones utilizadas en el elemento *equation* denominado Modo Control son las siguientes:

Control calefacción

$$CAL_ON = TERMOS_CAL_ENT * HORARIO_ACOND_ENT \quad (H.15)$$

Control refrigeración

$$REF_ON = TERMOS_REF_ENT * HORARIO_ACOND_ENT \quad (H.16)$$

Control ventilación sin acondicionamiento

$$DAMPER_BC = (GT(HUM_REL_INT_ENT, 60) * 0.15 + \\ (1 - GT(HUM_REL_INT_ENT, 60)) * 0.1) * HORARIO_ACOND_ENT \quad (H.17)$$

Condiciones de activación del Modo Acumulación

$$MODO_ACU = EQL(TIME, 0) * 0 + \\ (1 - EQL(TIME, 0)) * OR(AND(GT(T_INT_S3, 21), EQL(REF_ON, 0)), EQL(REF_ON, 1)) \quad (H.18)$$

Condiciones de activación del Modo Calefacción Asistida

$$MODO_CAL_ASIS = AND(EQL(CAL_ON, 1), GT(T_DEP_ENT, T_GEO_ENT)) \quad (H.19)$$

Condiciones de activación del Modo Calefacción

$$MODO_CAL = AND(EQL(CAL_ON, 1), LE(T_DEP_ENT, T_GEO_ENT)) \quad (H.20)$$

Condiciones de activación del Modo Refrigeración

$$MODO_REF = EQL(TIME, 0) * 0 + (1 - EQL(TIME, 0)) * EQL(REF_ON, 1) \quad (H.21)$$

Condiciones de activación del Modo Apagado

$$\begin{aligned} MODO_APGD = \\ & AND(AND(EQL(MODO_ACU, 0), EQL(MODO_CAL_ASIS, 0)), \\ & AND(EQL(MODO_CAL, 0), EQL(MODO_REF, 0))) \end{aligned} \quad (H.22)$$

Condiciones de act. de la bomba impulsora B_GEO

$$\begin{aligned} B_GEO = EQL(MODO_CAL, 1) * 1 + EQL(MODO_REF, 1) * 1 + \\ EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_ACU, 1) * 0 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \end{aligned} \quad (H.23)$$

Condiciones de act. de la bomba de retorno B_RET_GEO

$$B_RET_GEO = EQL(MODO_CAL, 1) * 1 + EQL(MODO_REF, 1) * 1 + \\ EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_ACU, 1) * 0 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \quad (H.24)$$

Condiciones de act. de la bomba de retorno B_RET_BC

$$B_RET_BC = EQL(MODO_CAL, 1) * 1 + EQL(MODO_REF, 1) * 1 + \\ EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_ACU, 1) * 0 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \quad (H.25)$$

Condiciones de reg. de la válvula divisora DIV_VIDRIO

$$DIV_VIDRIO = EQL(MODO_CAL, 1) * 0 + EQL(MODO_REF, 1) * 0 + \\ EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_ACU, 1) * 0 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \quad (H.26)$$

Condiciones de act. de la bomba de retorno B_DEP_VIDRIO

$$B_DEP_VIDRIO = EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_ACU, 1) * 1 + \\ EQL(MODO_REF, 1) * 1 + EQL(MODO_CAL, 1) * 0 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \quad (H.27)$$

Condiciones de act. de la bomba de retorno B_VIDRIO_DEP

$$B_VIDRIO_DEP = EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_ACU, 1) * 1 + EQL(MODO_REF, 1) * 1 + \\ EQL(MODO_CAL, 1) * 0 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \quad (H.28)$$

Condiciones de reg. de la vál. divisora DIV_GEOTERMIA

$$\begin{aligned} DIV_GEOTERMIA = & EQL(MODO_CAL, 1) * 1 + EQL(MODO_REF, 1) * 1 + \\ & EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 0 + EQL(MODO_ACU, 1) * 1 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \end{aligned} \quad (H.29)$$

Condiciones de reg. de la vál. divisora DIV_TANQUE_VIDRIO

$$\begin{aligned} DIV_TANQUE_VIDRIO = & EQL(MODO_CAL, 1) * 0 + EQL(MODO_REF, 1) * 0 + \\ & EQL(MODO_CAL_ASIS, 1) * 1 + EQL(MODO_ACU, 1) * 0 + EQL(MODO_APGD, 1) * 0 \end{aligned} \quad (H.30)$$

Condiciones de activación del vidrio activo

$$VID_ON = OR(OR(EQL(MODO_ACU, 1), EQL(MODO_REF, 1)), EQL(MODO_CAL_ASIS, 1)) \quad (H.31)$$

Asignación del ID del vidrio activo

$$WINDOW_ID = EQL(VID_ON, 1) * 14956 + NE(VID_ON, 1) * 13903 \quad (H.32)$$

Evaluación económica de los escenarios simulados

I.1. Evaluación económica del Escenario 2

Tabla I.1: Flujos del Escenario 2

AÑO	Coste energía (€/kWh)	Ahorro anual (€)	Coste mant. (€)	Ahorro anual neto (€)	Flujo generado acum. (€)	Flujo neto acum. (€)
0		-15,503.91 €		-15,503.91 €		-15,503.91 €
1	0.2300	324.82 €	-32.48 €	292.34 €	292.34 €	-15,211.57 €
2	0.2530	357.31 €	-35.73 €	321.58 €	613.92 €	-14,889.99 €
3	0.2783	393.04 €	-39.30 €	353.73 €	967.65 €	-14,536.26 €
4	0.3061	432.34 €	-43.23 €	389.11 €	1,356.76 €	-14,147.15 €
5	0.3367	475.57 €	-47.56 €	428.02 €	1,784.77 €	-13,719.14 €
6	0.3704	523.13 €	-52.31 €	470.82 €	2,255.59 €	-13,248.32 €
7	0.4075	575.45 €	-57.54 €	517.90 €	2,773.49 €	-12,730.42 €
8	0.4482	632.99 €	-63.30 €	569.69 €	3,343.19 €	-12,160.72 €
9	0.4930	696.29 €	-69.63 €	626.66 €	3,969.85 €	-11,534.06 €
10	0.5423	765.92 €	-76.59 €	689.33 €	4,659.17 €	-10,844.74 €
11	0.5966	842.51 €	-84.25 €	758.26 €	5,417.43 €	-10,086.48 €
12	0.6562	926.76 €	-92.68 €	834.08 €	6,251.51 €	-9,252.40 €
13	0.7218	1,019.44 €	-101.94 €	917.49 €	7,169.01 €	-8,334.90 €
14	0.7940	1,121.38 €	-112.14 €	1,009.24 €	8,178.25 €	-7,325.66 €
15	0.8734	1,233.52 €	-123.35 €	1,110.17 €	9,288.42 €	-6,215.49 €
16	0.9608	1,356.87 €	-135.69 €	1,221.18 €	10,509.60 €	-4,994.31 €
17	1.0568	1,492.56 €	-149.26 €	1,343.30 €	11,852.90 €	-3,651.01 €
18	1.1625	1,641.81 €	-164.18 €	1,477.63 €	13,330.53 €	-2,173.38 €
19	1.2788	1,805.99 €	-180.60 €	1,625.39 €	14,955.93 €	-547.98 €
20	1.4067	1,986.59 €	-198.66 €	1,787.93 €	16,743.86 €	1,239.95 €

Continúa en la página siguiente

Tabla I.1: Flujos del Escenario 2 (Cont.)

AÑO	Coste energía (€/kWh)	Ahorro anual (€)	Coste mant. (€)	Ahorro anual neto (€)	Flujo generado acum. (€)	Flujo neto acum. (€)
21	1.5473	2,185.25 €	-218.53 €	1,966.73 €	18,710.59 €	3,206.68 €
22	1.7021	2,403.78 €	-240.38 €	2,163.40 €	20,873.99 €	5,370.08 €
23	1.8723	2,644.16 €	-264.42 €	2,379.74 €	23,253.73 €	7,749.82 €
24	2.0595	2,908.57 €	-290.86 €	2,617.71 €	25,871.45 €	10,367.54 €
25	2.2654	3,199.43 €	-319.94 €	2,879.49 €	28,750.93 €	13,247.02 €
26	2.4920	3,519.37 €	-351.94 €	3,167.43 €	31,918.37 €	16,414.46 €
27	2.7412	3,871.31 €	-387.13 €	3,484.18 €	35,402.55 €	19,898.64 €
28	3.0153	4,258.44 €	-425.84 €	3,832.60 €	39,235.14 €	23,731.23 €
29	3.3168	4,684.28 €	-468.43 €	4,215.86 €	43,451.00 €	27,947.09 €
30	3.6485	5,152.71 €	-515.27 €	4,637.44 €	48,088.44 €	32,584.53 €

I.2. Evaluación económica del Escenario 3-1

Tabla I.2: Flujos del Escenario 3-1

AÑO	Coste energía (€/kWh)	Ahorro anual (€)	Coste mant. (€)	Ahorro anual neto (€)	Flujo generado acum. (€)	Flujo neto acum. (€)
0		-17,350.31 €		-17,350.31 €		-17,350.31 €
1	0.2300	347.57 €	-34.76 €	312.81 €	312.81 €	-17,037.50 €
2	0.2530	382.33 €	-38.23 €	344.10 €	656.91 €	-16,693.40 €
3	0.2783	420.56 €	-42.06 €	378.51 €	1,035.42 €	-16,314.90 €
4	0.3061	462.62 €	-46.26 €	416.36 €	1,451.77 €	-15,898.54 €
5	0.3367	508.88 €	-50.89 €	457.99 €	1,909.76 €	-15,440.55 €
6	0.3704	559.77 €	-55.98 €	503.79 €	2,413.56 €	-14,936.76 €
7	0.4075	615.74 €	-61.57 €	554.17 €	2,967.73 €	-14,382.59 €
8	0.4482	677.32 €	-67.73 €	609.59 €	3,577.31 €	-13,773.00 €
9	0.4930	745.05 €	-74.51 €	670.55 €	4,247.86 €	-13,102.46 €
10	0.5423	819.56 €	-81.96 €	737.60 €	4,985.46 €	-12,364.86 €
11	0.5966	901.51 €	-90.15 €	811.36 €	5,796.82 €	-11,553.49 €
12	0.6562	991.66 €	-99.17 €	892.50 €	6,689.32 €	-10,661.00 €
13	0.7218	1,090.83 €	-109.08 €	981.75 €	7,671.06 €	-9,679.25 €
14	0.7940	1,199.91 €	-119.99 €	1,079.92 €	8,750.98 €	-8,599.33 €
15	0.8734	1,319.90 €	-131.99 €	1,187.91 €	9,938.90 €	-7,411.42 €
16	0.9608	1,451.89 €	-145.19 €	1,306.70 €	11,245.60 €	-6,104.71 €
17	1.0568	1,597.08 €	-159.71 €	1,437.37 €	12,682.97 €	-4,667.34 €
18	1.1625	1,756.79 €	-175.68 €	1,581.11 €	14,264.09 €	-3,086.23 €
19	1.2788	1,932.47 €	-193.25 €	1,739.22 €	16,003.31 €	-1,347.00 €
20	1.4067	2,125.72 €	-212.57 €	1,913.15 €	17,916.46 €	566.14 €

Continúa en la página siguiente

Tabla I.2: Flujos del Escenario 3-1 (Cont.)

AÑO	Coste energía (€/kWh)	Ahorro anual (€)	Coste mant. (€)	Ahorro anual neto (€)	Flujo generado acum. (€)	Flujo neto acum. (€)
21	1.5473	2,338.29 €	-233.83 €	2,104.46 €	20,020.92 €	2,670.60 €
22	1.7021	2,572.12 €	-257.21 €	2,314.91 €	22,335.82 €	4,985.51 €
23	1.8723	2,829.33 €	-282.93 €	2,546.40 €	24,882.22 €	7,531.90 €
24	2.0595	3,112.26 €	-311.23 €	2,801.04 €	27,683.26 €	10,332.94 €
25	2.2654	3,423.49 €	-342.35 €	3,081.14 €	30,764.40 €	13,414.08 €
26	2.4920	3,765.84 €	-376.58 €	3,389.25 €	34,153.65 €	16,803.34 €
27	2.7412	4,142.42 €	-414.24 €	3,728.18 €	37,881.83 €	20,531.51 €
28	3.0153	4,556.66 €	-455.67 €	4,101.00 €	41,982.83 €	24,632.51 €
29	3.3168	5,012.33 €	-501.23 €	4,511.10 €	46,493.92 €	29,143.61 €
30	3.6485	5,513.56 €	-551.36 €	4,962.21 €	51,456.13 €	34,105.82 €

I.3. Evaluación económica del Escenario 3-2

Tabla I.3: Flujos del Escenario 3-2

AÑO	Coste energía (€/kWh)	Ahorro anual (€)	Coste mant. (€)	Ahorro anual neto (€)	Flujo generado acum. (€)	Flujo neto acum. (€)
0		-20,163.36 €		-20,163.36 €		-20,163.36 €
1	0.2300	569.21 €	-56.92 €	512.29 €	512.29 €	-19,651.08 €
2	0.2530	626.13 €	-62.61 €	563.52 €	1,075.81 €	-19,087.56 €
3	0.2783	688.75 €	-68.87 €	619.87 €	1,695.68 €	-18,467.69 €
4	0.3061	757.62 €	-75.76 €	681.86 €	2,377.54 €	-17,785.83 €
5	0.3367	833.38 €	-83.34 €	750.04 €	3,127.58 €	-17,035.78 €
6	0.3704	916.72 €	-91.67 €	825.05 €	3,952.63 €	-16,210.74 €
7	0.4075	1,008.39 €	-100.84 €	907.55 €	4,860.18 €	-15,303.18 €
8	0.4482	1,109.23 €	-110.92 €	998.31 €	5,858.49 €	-14,304.88 €
9	0.4930	1,220.15 €	-122.02 €	1,098.14 €	6,956.63 €	-13,206.74 €
10	0.5423	1,342.17 €	-134.22 €	1,207.95 €	8,164.58 €	-11,998.79 €
11	0.5966	1,476.39 €	-147.64 €	1,328.75 €	9,493.33 €	-10,670.04 €
12	0.6562	1,624.02 €	-162.40 €	1,461.62 €	10,954.95 €	-9,208.42 €
13	0.7218	1,786.43 €	-178.64 €	1,607.78 €	12,562.73 €	-7,600.63 €
14	0.7940	1,965.07 €	-196.51 €	1,768.56 €	14,331.30 €	-5,832.07 €
15	0.8734	2,161.58 €	-216.16 €	1,945.42 €	16,276.72 €	-3,886.65 €
16	0.9608	2,377.73 €	-237.77 €	2,139.96 €	18,416.68 €	-1,746.69 €
17	1.0568	2,615.51 €	-261.55 €	2,353.96 €	20,770.63 €	607.27 €
18	1.1625	2,877.06 €	-287.71 €	2,589.35 €	23,359.99 €	3,196.62 €
19	1.2788	3,164.77 €	-316.48 €	2,848.29 €	26,208.28 €	6,044.91 €
20	1.4067	3,481.24 €	-348.12 €	3,133.12 €	29,341.39 €	9,178.03 €

Continúa en la página siguiente

Tabla I.3: Flujos del Escenario 3-2 (Cont.)

AÑO	Coste energía (€/kWh)	Ahorro anual (€)	Coste mant. (€)	Ahorro anual neto (€)	Flujo generado acum. (€)	Flujo neto acum. (€)
21	1.5473	3,829.37 €	-382.94 €	3,446.43 €	32,787.82 €	12,624.46 €
22	1.7021	4,212.30 €	-421.23 €	3,791.07 €	36,578.89 €	16,415.53 €
23	1.8723	4,633.53 €	-463.35 €	4,170.18 €	40,749.07 €	20,585.71 €
24	2.0595	5,096.89 €	-509.69 €	4,587.20 €	45,336.27 €	25,172.91 €
25	2.2654	5,606.57 €	-560.66 €	5,045.92 €	50,382.19 €	30,218.82 €
26	2.4920	6,167.23 €	-616.72 €	5,550.51 €	55,932.70 €	35,769.33 €
27	2.7412	6,783.95 €	-678.40 €	6,105.56 €	62,038.26 €	41,874.89 €
28	3.0153	7,462.35 €	-746.24 €	6,716.12 €	68,754.37 €	48,591.01 €
29	3.3168	8,208.59 €	-820.86 €	7,387.73 €	76,142.10 €	55,978.73 €
30	3.6485	9,029.44 €	-902.94 €	8,126.50 €	84,268.60 €	64,105.23 €

I.4. Evaluación económica del Escenario 4-1

Tabla I.4: Flujos del Escenario 4-1

AÑO	Coste energía (€/kWh)	Ahorro anual (€)	Coste mant. (€)	Ahorro anual neto (€)	Flujo generado acum. (€)	Flujo neto acum. (€)
0		-26,135.03 €		-26,135.03 €		-26,135.03 €
1	0.2300	402.55 €	-40.25 €	362.29 €	362.29 €	-25,772.74 €
2	0.2530	442.80 €	-44.28 €	398.52 €	760.82 €	-25,374.22 €
3	0.2783	487.08 €	-48.71 €	438.37 €	1,199.19 €	-24,935.84 €
4	0.3061	535.79 €	-53.58 €	482.21 €	1,681.40 €	-24,453.63 €
5	0.3367	589.37 €	-58.94 €	530.43 €	2,211.84 €	-23,923.20 €
6	0.3704	648.31 €	-64.83 €	583.48 €	2,795.31 €	-23,339.72 €
7	0.4075	713.14 €	-71.31 €	641.82 €	3,437.14 €	-22,697.90 €
8	0.4482	784.45 €	-78.45 €	706.01 €	4,143.14 €	-21,991.89 €
9	0.4930	862.90 €	-86.29 €	776.61 €	4,919.75 €	-21,215.28 €
10	0.5423	949.19 €	-94.92 €	854.27 €	5,774.02 €	-20,361.01 €
11	0.5966	1,044.11 €	-104.41 €	939.70 €	6,713.71 €	-19,421.32 €
12	0.6562	1,148.52 €	-114.85 €	1,033.66 €	7,747.38 €	-18,387.65 €
13	0.7218	1,263.37 €	-126.34 €	1,137.03 €	8,884.41 €	-17,250.62 €
14	0.7940	1,389.70 €	-138.97 €	1,250.73 €	10,135.14 €	-15,999.89 €
15	0.8734	1,528.68 €	-152.87 €	1,375.81 €	11,510.95 €	-14,624.08 €
16	0.9608	1,681.54 €	-168.15 €	1,513.39 €	13,024.34 €	-13,110.69 €
17	1.0568	1,849.70 €	-184.97 €	1,664.73 €	14,689.07 €	-11,445.97 €
18	1.1625	2,034.67 €	-203.47 €	1,831.20 €	16,520.27 €	-9,614.77 €
19	1.2788	2,238.13 €	-223.81 €	2,014.32 €	18,534.59 €	-7,600.45 €
20	1.4067	2,461.95 €	-246.19 €	2,215.75 €	20,750.34 €	-5,384.69 €

Continúa en la página siguiente

Tabla I.4: Flujos del Escenario 4-1 (Cont.)

AÑO	Coste energía (€/kWh)	Ahorro anual (€)	Coste mant. (€)	Ahorro anual neto (€)	Flujo generado acum. (€)	Flujo neto acum. (€)
21	1.5473	2,708.14 €	-270.81 €	2,437.33 €	23,187.67 €	-2,947.37 €
22	1.7021	2,978.96 €	-297.90 €	2,681.06 €	25,868.73 €	-266.31 €
23	1.8723	3,276.85 €	-327.69 €	2,949.17 €	28,817.89 €	2,682.86 €
24	2.0595	3,604.54 €	-360.45 €	3,244.08 €	32,061.97 €	5,926.94 €
25	2.2654	3,964.99 €	-396.50 €	3,568.49 €	35,630.46 €	9,495.43 €
26	2.4920	4,361.49 €	-436.15 €	3,925.34 €	39,555.80 €	13,420.77 €
27	2.7412	4,797.64 €	-479.76 €	4,317.87 €	43,873.68 €	17,738.64 €
28	3.0153	5,277.40 €	-527.74 €	4,749.66 €	48,623.34 €	22,488.31 €
29	3.3168	5,805.14 €	-580.51 €	5,224.63 €	53,847.97 €	27,712.93 €
30	3.6485	6,385.66 €	-638.57 €	5,747.09 €	59,595.06 €	33,460.02 €

I.5. Evaluación económica del Escenario 4-2

Tabla I.5: Flujos del Escenario 4-2

AÑO	Coste energía (€/kWh)	Ahorro anual (€)	Coste mant. (€)	Ahorro anual neto (€)	Flujo generado acum. (€)	Flujo neto acum. (€)
0		-33,154.75 €		-33,154.75 €		-33,154.75 €
1	0.2300	589.25 €	-58.92 €	530.32 €	530.32 €	-32,624.43 €
2	0.2530	648.17 €	-64.82 €	583.36 €	1,113.68 €	-32,041.07 €
3	0.2783	712.99 €	-71.30 €	641.69 €	1,755.37 €	-31,399.38 €
4	0.3061	784.29 €	-78.43 €	705.86 €	2,461.23 €	-30,693.52 €
5	0.3367	862.72 €	-86.27 €	776.45 €	3,237.68 €	-29,917.07 €
6	0.3704	948.99 €	-94.90 €	854.09 €	4,091.77 €	-29,062.98 €
7	0.4075	1,043.89 €	-104.39 €	939.50 €	5,031.27 €	-28,123.48 €
8	0.4482	1,148.28 €	-114.83 €	1,033.45 €	6,064.72 €	-27,090.03 €
9	0.4930	1,263.11 €	-126.31 €	1,136.80 €	7,201.52 €	-25,953.23 €
10	0.5423	1,389.42 €	-138.94 €	1,250.48 €	8,451.99 €	-24,702.76 €
11	0.5966	1,528.36 €	-152.84 €	1,375.52 €	9,827.51 €	-23,327.24 €
12	0.6562	1,681.19 €	-168.12 €	1,513.07 €	11,340.59 €	-21,814.16 €
13	0.7218	1,849.31 €	-184.93 €	1,664.38 €	13,004.97 €	-20,149.78 €
14	0.7940	2,034.25 €	-203.42 €	1,830.82 €	14,835.79 €	-18,318.96 €
15	0.8734	2,237.67 €	-223.77 €	2,013.90 €	16,849.69 €	-16,305.06 €
16	0.9608	2,461.44 €	-246.14 €	2,215.29 €	19,064.99 €	-14,089.76 €
17	1.0568	2,707.58 €	-270.76 €	2,436.82 €	21,501.81 €	-11,652.94 €
18	1.1625	2,978.34 €	-297.83 €	2,680.50 €	24,182.31 €	-8,972.44 €
19	1.2788	3,276.17 €	-327.62 €	2,948.55 €	27,130.87 €	-6,023.88 €
20	1.4067	3,603.79 €	-360.38 €	3,243.41 €	30,374.28 €	-2,780.47 €

Continúa en la página siguiente

Tabla I.5: Flujos del Escenario 4-2 (Cont.)

AÑO	Coste energía (€/kWh)	Ahorro anual (€)	Coste mant. (€)	Ahorro anual neto (€)	Flujo generado acum. (€)	Flujo neto acum. (€)
21	1.5473	3,964.17 €	-396.42 €	3,567.75 €	33,942.03 €	787.28 €
22	1.7021	4,360.59 €	-436.06 €	3,924.53 €	37,866.56 €	4,711.81 €
23	1.8723	4,796.64 €	-479.66 €	4,316.98 €	42,183.54 €	9,028.79 €
24	2.0595	5,276.31 €	-527.63 €	4,748.68 €	46,932.21 €	13,777.46 €
25	2.2654	5,803.94 €	-580.39 €	5,223.54 €	52,155.76 €	19,001.01 €
26	2.4920	6,384.33 €	-638.43 €	5,745.90 €	57,901.66 €	24,746.91 €
27	2.7412	7,022.77 €	-702.28 €	6,320.49 €	64,222.15 €	31,067.40 €
28	3.0153	7,725.04 €	-772.50 €	6,952.54 €	71,174.69 €	38,019.94 €
29	3.3168	8,497.55 €	-849.75 €	7,647.79 €	78,822.48 €	45,667.73 €
30	3.6485	9,347.30 €	-934.73 €	8,412.57 €	87,235.05 €	54,080.30 €